UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA - UNAD

ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS, PECUARIAS Y DEL MEDIO AMBIENTE

PROPIEDADES Y CONTAMINACIÓN DEL SUELO

Autor:
Ing. MSc. OSCAR EDUARDO SANCLEMENTE REYES

PALMIRA
Julio de 2011

CONTENIDO

ASPECTOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL Y VERSIONAMIENTO 6
INTRODUCCIÓN 7
UNIDAD 1. CARACTERIZACIÓN Y PROPIEDADES DEL SUELO 10
CAPITULO 1. COMPOSICIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL SUELO 10
Lección 1. El suelo: Aproximación conceptual 10
Lección 2. Formación del suelo. 12
Lección 3. Impacto hidrológico y degradación del suelo. 21
Lección 4. Perfil y composición del suelo 25
Lección 5. Clasificación de suelos. 29
CAPITULO 2. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL SUELO 33
Lección 6. Indicadores de calidad del suelo 33
Lección 7. Propiedades físicas del suelo (Estructura, textura, Color, densidad y porosidad) 35
Lección 8. Humedad, infiltración, permeabilidad, Consistencia y profundidad efectiva del suelo. 41
Lección 9. Las propiedades químicas del suelo (Intercambio iónico, acidez – alcalinidad). 44
Lección 10. Contenido de materia orgánica y fertilidad 49
CAPITULO 3. TRANSPORTE DE CONTAMINANTES 53
Lección 11. Principios de flujo y transporte de contaminantes en el suelo. 53
Lección 12. Procesos de flujo y transporte de contaminantes. 56
Lección 13. Procesos en la interfase sólido – líquido 58
Lección 14. Mecanismos de interacción suelo – contaminantes 62
Lección 15. Interacción de los contaminantes del suelo con el agua subterránea. 65
UNIDAD 2. MANEJO DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO 69
CAPITULO 4. PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL SUELO 69
Lección 16. Principales contaminantes del suelo. Introducción y conceptos generales. 69
Lección 17. Contaminación por Ácidos, lluvia ácida, sales y nutrientes. 72
Lección 18. Contaminación por Plaguicidas y Herbicidas. 76
Lección 19. Contaminación por metales pesados e hidrocarburos. 79
Lección 20. Contaminación por microorganismos patógenos y residuos sólidos. 83
CAPITULO 5. MONITOREO Y PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO 87
Lección 21. Introducción y conceptos generales del monitoreo de suelos. 87
Lección 22. Muestreo de suelos 89
Lección 23. Monitoreo de suelos 93
Lección 24. Indicadores de calidad ambiental de suelos. 95
Lección 25. Niveles de Referencia y niveles de intervención de suelos contaminados. 98
CAPITULO 6. CONTROL Y TRATAMIENTO DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO 101
Lección 26. Introducción y conceptos generales sobre el control y tratamiento de la contaminación del suelo. 101
Lección 27. Métodos de aislamiento y confinamiento de suelos 103
Lección 28. Métodos físico químicos. 107
Lección 29. Métodos biológicos. 113
Lección 30. Normatividad Ambiental. 117
BIBLIOGRAFÍA 123
CIBERGRAFÍA 127

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Composición porcentual de los minerales primarios presentes en las rocas. 14
Cuadro 2. Principales minerales característicos de las rocas. 15
Cuadro 3. Zonas de vida para Colombia. 17
Cuadro 4. Pisos altitudinales climáticos y su relación con la altitud y temperatura. 18
Cuadro 5. Efecto de la longitud y gradiente de la pendiente del suelo, sobre los procesos de pérdida de suelo por erosión (promedio de 8 años) en Chinchiná Caldas (Colombia). 20
Cuadro 6. Significado de letras minúsculas dentro de la nomenclatura de los horizontes del perfil del suelo. 26
Cuadro 7. Algunos indicadores de calidad del suelo, según sus propiedades y algunas variables de medición. 34
Cuadro 8. Clase de partícula componente del suelo, de acuerdo al tamaño de su diámetro. 38
Cuadro 9. Clasificación de un suelo según su porcentaje de porosidad total. 41
Cuadro 10. Valores de CIC promedios de algunos coloides presentes en el suelo. 46
Cuadro 11. Clasificación de los suelos según el valor del pH. 48
Cuadro 12. Caracterización del suelo de acuerdo a sus contenidos de materia orgánica en (bajo, medio o alto). 51
Cuadro 13. Clasificación de la conductividad hidráulica del suelo en ($cm.h^{-1}$) 55
Cuadro 14. Clasificación de la movilidad de contaminantes plaguicidas en el suelo. 59
Cuadro 15. Características de movilidad de algunos agroquímicos en el suelo. 60
Cuadro 16. Volatilización potencial de algunos (COV´s) y su vida media en el suelo. 62
Cuadro 17. Resistencia y susceptibilidad a la hidrólisis de compuestos orgánicos. 63
Cuadro 18. Tolerancia de algunas plantas a la salinidad del suelo. 75
Cuadro 19. Categoría de toxicidad de pesticidas, según su valor de DL50. 77
Cuadro 20. Procedencia de los metales según su uso en actividades económicas y/o industriales. 79
Cuadro 21. Movilidad relativa de algunos metales pesados en el suelo, de acuerdo a condiciones de pH (ácido, neutro o alcalino) y a condiciones de oxidación (buena aireación) o reducción (condiciones de anegamiento). 80
Cuadro 22. Organismos del suelo que se convierten en patógenos para los cultivos. 84
Cuadro 23. Componentes de algunos materiales presentes en los residuos sólidos urbanos. 85
Cuadro 24. Análisis de la exposición de contaminantes del suelo en seres humanos y sistemas ecológicos. 94
Cuadro 25. Propiedades indicadoras de calidad ambiental del suelo. 96
Cuadro 26. Actividades de la microflora y fauna del suelo en el proceso de descomposición y en la estructura del suelo. 97
Cuadro 27. Niveles críticos de referencia de concentración de contaminantes del suelo. 98
Cuadro 28. Niveles máximos permisibles de concentración de metales pesados en suelos agrícolas. 99
Cuadro 29. Principales técnicas de recuperación de suelos. 102
Cuadro 30. Principales tratados internacionales en el marco del manejo de plaguicidas. 119
Cuadro 31. Normatividad ambiental colombiana en torno a la protección del suelo y la regulación de sustancias químicas peligrosas. 120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo geológico de las rocas. 13
Figura 2. Relación entre elementos químicos, minerales y rocas. 14
Cuadro 1. Composición porcentual de los minerales primarios presentes en las rocas. 14
Figura 3. Ilustración de la estructura tetraédrica básica de los minerales silicatados. 15
Figura 4. Estructura geométrica de los silicatos que componen los minerales primarios. 16
Figura 5. Macroorganismos presentes en el suelo. 19
Figura 6. Ciclo del agua en la naturaleza. 22
Figura 7. Imagen de alud de tierra causada por deslizamientos en época invernal, municipio de Copacabana Antioquia, en junio de 2011. 23
Figura 8. Imágenes de inundaciones en el municipio de Ubaté Cundinamarca en junio de 2011. 24
Figura 9. Ejemplos de descripción del perfil del suelo, mediante uso de nomenclatura de los horizontes. 26
Figura 10. Distribución porcentual ideal de las tres fases constituyentes del suelo. 27
Figura 11. Grado de evolución de los suelos. 30
Figura 12. Algunos órdenes de suelo y sus características morfológicas. (A) Andisol, (B) Entisol, (C) Inceptisol, (D) Alfisol, (E) Molisol y (F) Oxisol. 32
Figura 13. Algunas formas de estructura del suelo. (A) Bloques, (B) prismática, (C) Columnar, (D) Laminar, (E) bioestructura formada por raíz, (F) bioestructura formada por lombrices. 37
Figura 14. Triángulo textural del suelo. 38
Figura 15. Efecto del tipo de arcilla del suelo, sobre su capacidad de retención de humedad. 42
Figura 16. Diferentes modelos de doble capa difusa. 46
Figura 17. Componentes de la materia orgánica. 49
Figura 18. Componentes del humus del suelo 50
Figura 19. Representación esquemática de un permeámetro con cabeza constante de agua. 54
Figura 20. Propagación de una sustancia contaminante en el suelo. 57
Figura 21. Afectación de contaminantes al subsuelo y aguas subsuperficiales. 57
Figura 22. Tendencia de bioacumulación de Cadmio (Cd) por algunos vegetales. 60
Figura 23. Diagrama de movilidad de los metales pesados en suelo. 61
Figura 24. Esquema de la biodegradación de sustratos contaminantes en el suelo. 64
Figura 25. Procesos de interacción de sustancias contaminantes con los componentes del suelo y la atmósfera, previos a la descarga a mantos acuíferos. 65
Figura 26. Modelo de contaminación de mantos acuíferos por descargas subterráneas de pozo séptico. 66
Figura 27. Trayectoria de incorporación de los contaminantes. 70
Figura 28. Tipos de contaminación del suelo. 71
Figura 29. Formación de lluvia ácida. 73
Figura 30. Suelo contaminado por sales. 74
Figura 31. El suelo como regulador de sustancias químicas aplicadas en la agricultura. 76
Figura 32. Toxicidad relativa de algunos plaguicidas organofosforados y organoclorados. 77
Figura 33. Dinámica de los metales pesados en el suelo y el riesgo de contaminación de acuíferos y de biomagnificación en las redes tróficas. 81
Figura 34. Fotografía aérea de zona afectada por derrame de hidrocarburos. 82
Figura 35. Fuente de residuos sólidos urbanos en Colombia. 85
Figura 36. Modelo de contaminación de las aguas subterráneas por efecto del agua de lluvia en contacto con materiales de basurero. 86

Figura 37. Etapas de actuación y herramientas tecnológicas que caracterizan el monitoreo de suelos contaminado. 88
Figura 38. Modelos de distribución espacial de los muestreos de suelo contaminado. 91
Figura 39. Gráfico de probabilidad de detección de contaminantes con respecto al número de muestras de suelo y al modelo de distribución espacial. 92
Figura 40. Variables de mayor peso en el monitoreo de suelos y aguas subterráneas contaminadas. 93
Figura 41. Algunas formas de exposición a contaminantes presentes en el suelo. 100
Figura 42. Técnicas de aislamiento de suelos contaminados. 105
Figura 43. Técnica de confinamiento In situ por vitrificación. 106
Figura 44. Proceso de lavado de suelos contaminados. 108
Figura 45. Proceso de Flushing In situ, para tratamiento de suelos contaminados. 109
Figura 46. Proceso electrocinético de recuperación de suelos. 110
Figura 47. Barrera permeable activa para eliminar metales tóxicos del agua subterránea. 111
Figura 48. Proceso de inyección de aire comprimido para el tratamiento de contaminantes del suelo. 111
Figura 49. Biodegradación asistida de suelos contaminados. 114
Figura 50. Técnica de bioventing. 115
Figura 51. Tratamiento de suelos contaminados mediante lodos biológicos. 117

ASPECTOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL Y VERSIONAMIENTO

El contenido didáctico del curso teórico ***Propiedades y Contaminación del suelo*** fue diseñado por **Oscar Eduardo Sanclemente Reyes**, quien es Ingeniero Ambiental, Magíster en Ciencias Agrarias – Línea de investigación en suelos. Se ha desempeñado como instructor del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Docente del magisterio del Valle del Cauca y Docente investigador de la Universidad Nacional de Colombia en la sede Palmira. Para citar este material por favor hacerlo de la siguiente manera:

Sanclemente R., Oscar. (2011). *Propiedades y contaminación del suelo*. Módulo didáctico. Palmira: Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas el tema ambiental ha tomado bastante fuerza entre los organismos internacionales, ya que se han empezado a percibir los efectos negativos causados por actividades extractivas, degradativas y contaminantes. El cambio climático, la escasez y contaminación de los recursos hídricos, el incremento de la polución atmosférica, el inadecuado manejo de los residuos sólidos, la pérdida de la biodiversidad y la degradación del suelo; son los temas más preocupantes. La organización de las Naciones Unidas – ONU a través del PNUMA, así como gobiernos mundiales y ONG´s internacionales, han comenzado una carrera hacia la generación de políticas internacionales de conservación de los recursos naturales. La Agenda 21 de Río de Janeiro (1992), incluyó medidas como la lucha contra la deforestación, desertificación y contaminación, con miras a alcanzar un "desarrollo sostenible", entendido como aquel desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades. Sin embargo, casi dos décadas después se observa que la problemática ambiental ha empeorado. El incremento de la temperatura ambiental media, el deshielo de los casquetes polares, el aumento de los periodos de sequía e inundaciones, así como el incremento del hambre en algunos países por desabastecimiento de alimentos, son algunos de los síntomas de la problemática actual.

La FAO en 2008 alertó al mundo sobre los avanzados procesos de degradación y desertificación que están padeciendo los suelos agrícolas del planeta. Cerca del 20% de la superficie con potencial agrícola viene evidenciando severos procesos erosivos, de salinización, inundación y remoción masal; lo que está amenazando la productividad de alimentos para la subsistencia de la humanidad. Estos procesos han sido acelerados por el vertimiento de sustancias contaminantes y las inadecuadas prácticas agrícolas y pecuarias, como la excesiva mecanización, el inadecuado uso de agro insumos, el uso de suelos con alta fragilidad para la agricultura, la ganadería extensiva en zonas de ladera, la agricultura en zonas de páramo y la quema de material vegetal.

Este panorama mundial conduce a la necesidad de crear espacios académicos de formación tendientes a generar una masa crítica y propositiva en torno a temas específicos de la problemática ambiental. El problema de la contaminación del suelo es uno de los más graves, ya que la pérdida de su potencial productivo pone en riesgo la alimentación mundial y contribuye a agravar otros procesos como la contaminación de los recursos hídricos.

El presente módulo de formación es un curso específico de los programas ambientales de la ECAPMA de la UNAD. Este módulo tiene la intención de desarrollar en los estudiantes conocimientos y competencias para el manejo adecuado del suelo, a partir de su caracterización y las opciones de prevención, recuperación, tratamiento y control existentes. El módulo se estructura en 2 unidades, equivalentes a 6 capítulos y 30 lecciones, y pretende fomentar competencias académicas relacionadas con la selección de soluciones de preservación, recuperación, tratamiento y control de la contaminación del suelo a través de la caracterización de sus propiedades y su interacción con los contaminantes ambientales, así como de la aplicación adecuada de las opciones de manejo existentes.

En la unidad 1, el estudiante encontrará una serie de conceptos y definiciones que le permitirán comprender la importancia del suelo, sus propiedades, constitución, clasificación y mecanismos de interacción con sustancias contaminantes. De esta manera se pretende fortalecer competencias básicas de conocimiento y contextualización del estudiante a la hora de diagnosticar aspectos ambientales de contaminación de suelos.

En la unidad 2, se presentan elementos conceptúales más específicos del área de la ingeniería ambiental, como las fuentes de contaminación, tipos de contaminantes, diseño y estrategias de monitoreo de suelos, herramientas de decisión con base a la normatividad ambiental vigente y algunas tecnologías de remediación de la contaminación del suelo. De esta forma se pretende enfocar al estudiante en líneas de investigación y profundización tendientes a prevenir, mitigar y controlar los impactos generados por el vertimiento de sustancias contaminantes del suelo, mediante herramientas biotecnológicas y de ingeniería.

En este sentido me permito darle la bienvenida a este curso de ***Propiedades y Contaminación del suelo***, esperando sea de su agrado y de gran utilidad dentro de su formación.

Muchos éxitos…

UNIDAD 1	
Nombre de la Unidad	**CARACTERIZACIÓN Y PROPIEDADES DEL SUELO**
CAPITULO 1	**COMPOSICIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL SUELO**
LECCION 1	El suelo: Aproximación conceptual
LECCION 2	Formación del suelo
LECCIÓN 3	Impacto hidrológico y degradación del suelo
LECCION 4	Perfil y composición del suelo
LECCION 5	Clasificación de suelos
CAPITULO 2	**PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO**
LECCIÓN 6	Indicadores de calidad del suelo
LECCIÓN 7	Estructura, color, textura y permeabilidad del suelo
LECCIÓN 8	Humedad, drenaje, consistencia y profundidad efectiva del suelo
LECCIÓN 9	Coloides, reacción del suelo, acidez y alcalinidad
LECCIÓN 10	Contenido de materia orgánica y fertilidad del suelo
CAPITULO 3	**TRANSPORTE DE CONTAMINANTES**
LECCIÓN 11	Principios de flujo y transporte de contaminantes en el suelo
LECCIÓN 12	Procesos de flujo y transporte de contaminantes
LECCIÓN 13	Procesos en la interfase sólido - líquido
LECCIÓN 14	Mecanismos de interacción suelo - contaminantes
LECCIÓN 15	Interacción de los contaminantes del suelo con el agua subterránea

UNIDAD 1. CARACTERIZACIÓN Y PROPIEDADES DEL SUELO

CAPITULO 1. COMPOSICIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL SUELO

El conocimiento del suelo y los distintos factores que influyen en su formación, constituyen elementos conceptuales fundamentales a la hora de afrontar problemáticas en torno a los procesos de degradación y contaminación que puedan afectarle. Cada región geográfica presenta condiciones ambientales particulares que definen el tipo de suelo y la vegetación natural que puede albergar. Así mismo, se pueden establecer ciertos cultivos de interés económico de acuerdo al grado de adaptabilidad agroecológica de las especies empleadas. Colombia presenta diversidad de pisos térmicos y alta actividad volcánica lo que ha permitido la formación de diferentes órdenes de suelo en toda su extensión. Lo anterior, correlaciona con la alta diversidad de especies de flora y fauna que alberga la nación y su gran potencial agropecuario. La producción hídrica del país, está directamente relacionada con el uso forestal de los suelos en las zonas altas y medias de las cuencas hidrográficas, por ello la importancia del manejo adecuado de los suelos y la protección de las selvas. El presente capítulo, pretende fortalecer conocimientos básicos en la ciencia del suelo, con el fin de que el participante adquiera herramientas para reconocer los distintos tipos de suelo dentro de los posibles escenarios de su actuación profesional.

Lección 1. El suelo: Aproximación conceptual

En esta primera lección, abordaremos quizá los interrogantes más importantes del curso. ¿Qué es el suelo y cuál es su importancia para los ecosistemas terrestres y el hombre?. Seguramente, la mayoría de ustedes los participantes del curso habrán tenido muchas experiencias relativas al uso del suelo, sus características o los bienes y servicios que el mismo provee al ser humano.

La visita a reservas forestales, lotes de cultivo, plazas de mercado y supermercados de cadena; permiten hacer planteamientos enfocados hacia la importancia de la diversidad vegetal que puede albergar determinada zona geográfica y la cantidad de productos que pueden obtenerse para el consumo a través de los cultivos, así como la productividad de agua dulce para abastecimiento de las ciudades, el riego de terrenos agrícolas, la producción de electricidad, entre otros usos. Pues bien, estos servicios ecosistémicos de los que disfrutamos a diario, se deben en gran medida a las características y potencialidades de los suelos de la región donde vivimos.

Conceptualmente, el término suelo, que deriva del latín *solum*, significa piso, y puede definirse como la capa superior de la Tierra que se distingue de la roca sólida y en donde las plantas crecen (Navarro y Navarro, 2000). Las primeras aproximaciones conceptuales del suelo, las hizo Dokuchaev (a finales del siglo XIX), quien propuso la palabra suelo como término científico y lo definió como: “Aquellos horizontes de roca que, diaria o casi diariamente, cambian sus relaciones bajo el influjo conjunto del agua, el aire y varias formas de organismos vivientes y muertos”.

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), ente encargado de la nomenclatura y de las claves taxonómicas internacionales del suelo, define al mismo como: "Cuerpo natural compuesto de sólidos (materia mineral y orgánica), líquidos y gases, que ocurre sobre la superficie de la tierra, ocupa un espacio y está caracterizado por una o ambas de las siguientes: Horizontes, o capas diferenciadas del material de origen como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia o bien por la capacidad para soportar las raíces de las plantas en el medio ambiente natural" (Soil Survey Staff, 1998).

Sin embargo, en la actualidad se vienen considerando otras definiciones del suelo de manera sistémica, como la de Sánchez de Prager (2007), definiendo al suelo como: "un sistema vivo, debido a que *nace* sufre una génesis que lleva a su formación; tiene *una estructura*, que la confieren los coloides minerales, orgánicos y los organismos; *posee metabolismo propio*, aspira oxígeno (O_2) y libera gas carbónico (CO_2) mediante procesos de mineralización y síntesis; *forma materiales de reserva*, humus, y puede *envejecer y morir*".

Estas aproximaciones conceptuales, muestran la importancia del suelo como recurso natural, que provee una gran cantidad de servicios ecológicos, agrícolas, pecuarios y urbanísticos al ser humano. A pesar de ello, el suelo es un recurso natural no renovable que puede sufrir procesos de degradación y contaminación de manera natural o antrópica; que lo hacen muy susceptible.

El desarrollo económico y social de los pueblos, está altamente relacionado con la calidad de sus suelos, convirtiéndolo en un recurso vital para la seguridad y soberanía de sus pobladores. Debido a ésto, el reconocimiento y las formas de uso, manejo y conservación de sus suelos; toman gran importancia dentro de los mecanismos de ordenamiento y planificación del territorio de una nación.

Conceptos clave:

"El suelo es un sistema vivo, ya que sufre una génesis para su formación, posee metabolismo propio, forma materiales de reserva y puede llegar a envejecer y morir" (Sánchez de Prager, 2007).

Recursos:

Lectura sugerida:

Tovar. C. (2009). El suelo en las ciudades Latinoamericanas. Publicado en la revista Urbano Territorial de la Universidad Nacional de Colombia, Vol. 14, No. 1, pp 7 -12.

Disponible en:
http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/748/74811914001.pdf

Lección 2. Formación del suelo.

Como se describió con anterioridad, el suelo *nace*; es decir la génesis o inicio del suelo se puede dar en cualquier parte del mundo, en condiciones climatológicas y topográficas específicas dentro de una unidad de paisaje, en un proceso evolutivo gradual (Sánchez de P., 2007). La génesis de un suelo es el resultado de las interacciones de factores pedológicos que bajo la acción de procesos de pérdidas, ganancias, transformaciones y translocaciones, imprime a éste características determinadas.

La formación del suelo, se realiza a medida que los materiales parentales (de origen), se desintegran por procesos físicos como la acción del agua, la temperatura, el viento, el relieve y la gravedad; químicos como los procesos de oxidación, reducción, hidrólisis, hidratación, descomposición, carbonatación y solubilización; así como biológicos ocasionados por la perturbación realizada por las raíces de las plantas, hormigas, termitas, lombrices y otros organismos que crean canales, poros y agregados que van a influir en el transporte de gases, agua y nutrientes. Estos factores y procesos de formación, van a darle al suelo características morfológicas, físicas, químicas y biológicas particulares, dentro de un paisaje geográfico determinado.

Factores de formación del suelo

El suelo puede ser considerado como una determinada combinación de sus factores formadores. Esta concepción de suelo fue expresada por primera vez por Jenny (1940), según la siguiente función:

$$SUELO = f\ (Mp, C, O, R, T)$$

Donde: Mp (Material parental), C (Clima), O (Organismos), R (Relieve) y T (Tiempo).

Las interacciones entre los distintos factores de formación, van a darle al suelo sus características propias, nivel de desarrollo y propiedades; que lo habilitan para distintos usos.

- **Material Parental**

Se define el material parental como aquel material orgánico o inorgánico como el mineral no consolidado y más o menos químicamente alterado, a partir del cual el suelo es sintetizado (IGAC y CVC, 2004). La fuente primaria de materiales inorgánicos lo constituyen las rocas. Las rocas, pueden clasificarse en: rocas ígneas (originarias del magma a muy altas temperaturas), rocas sedimentarias (formadas en la superficie terrestre o cerca de ella) y rocas metamórficas (formadas a partir de las anteriores mediante procesos de metamorfismo).

Sin embargo, todas las rocas están relacionadas a través del ciclo geológico de las rocas (Figura 1). Las rocas ígneas, se forman en el magma y son expulsadas a la superficie mediante erupciones volcánicas. Posteriormente las rocas ígneas pueden sufrir transformaciones mediante erosión, transporte, meteorización y compactación convirtiéndose en rocas de menor tamaño con forma de sedimentos. Algunas rocas ígneas y sedimentarias, son transformadas mediante procesos de metamorfismo a muy altas presiones y temperaturas (entre 200ºC hasta 650ºC), lo que genera cambios estructurales de los minerales constituyentes y nuevas estructuras laminares, convirtiéndolas en rocas metamórficas. El ciclo geológico de las rocas, retorna al inicio cuando los materiales metamórficos sufren procesos de fusión y cristalización en el magma volcánico, con lo que se pueden generar nuevamente rocas ígneas.

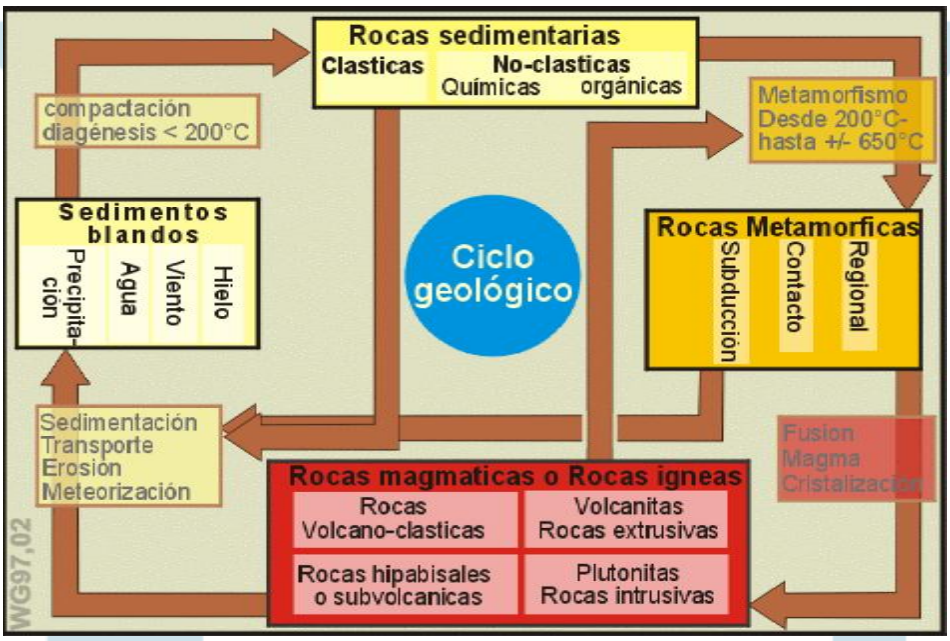

Figura 1. Ciclo geológico de las rocas.

Fuente: http://www.sap.uchile.cl/descargas/suelos/024Origen_y_Genesis_de_los_Suelos_I.pdf

Composición de las Rocas

Las rocas están compuestas por un conjunto de minerales, que a su vez, se constituyen por compuestos químicos. Un mineral, se define como un sólido homogéneo con estructura interna ordenada, de origen natural e inorgánico y de composición química definida. La figura 2, ilustra la relación entre los elementos químicos, los minerales y las rocas.

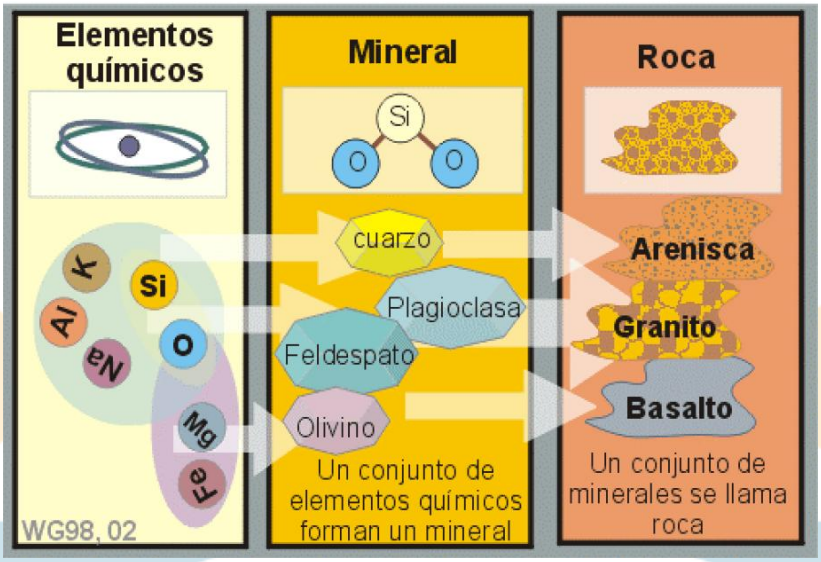

Figura 2. Relación entre elementos químicos, minerales y rocas.

Fuente: http://www.sap.uchile.cl/descargas/suelos/024Origen_y_Genesis_de_los_Suelos_I.pdf

Los minerales primarios que constituyen en mayor porcentaje a las rocas ígneas son los silicatos, los cuáles se encuentran constituidos principalmente por Silicio (Si) y Oxígeno (O). Otros elementos como el Aluminio (Al), Hierro (Fe), Calcio (Ca), Sodio (Na), Potasio (K), Magnesio (Mg) y Titanio (Ti); constituyen casi el 99.2% de los minerales presentes en las rocas. El Azufre (S), la Plata (Ag), el Oro (Au) y el Uranio (U); así como otros gases en disolución están presentes en el magma que forma las rocas pero en muy pequeñas cantidades. El cuadro 1, Muestra los nueve principales elementos que conforman los minerales primarios de las rocas.

Cuadro 1. Composición porcentual de los minerales primarios presentes en las rocas. Fuente: Jaramillo D. (2002).

Elemento	% presente en la corteza terrestre
Oxígeno	47
Silicio	27.5
Aluminio	8.6
Hierro	5.0
Calcio	3.5
Sodio	2.5
Potasio	2.5
Magnesio	2.0
Titanio	0.6
Total	99.2

La interacción de estos elementos, conforman minerales propios de las rocas. Minerales como el cuarzo, la magnetita y el olivino son característicos de las rocas ígneas; los anfíboles, las micas e hidróxidos son característicos de las rocas metamórficas y, la calcita, el yeso y la dolomita son característicos de las rocas sedimentarías (cuadro 2).

Cuadro 2. Principales minerales característicos de las rocas. Fuente: Jaramillo D. (2002).

MINERALES	TIPO DE ROCA
Olivinos (Forsterita, Fayalita)	Ígneas
Piroxenos (Augita, Diópsido, Hiperstena)	Ígneas y metamórficas de grado medio y alto
Anfiboles (Hornblenda, Actinolita)	Metamórficas de grado bajo y medio
Micas (Moscovita, Biotita)	Metamórficas y algunas rocas ígneas
Feldespato (Ortoclasa, Albita, Anortita)	Ígneas, metamórficas y sedimentarias
Cuarzo	Ígneas, sedimentarias
Carbonatos (Calcita, Dolomita)	Sedimentarias y algunas metamórficas
Yeso	Sedimentarias
Corindón	Ígneas y metamórficas
Hematita	Sedimentarias y metamórficas
Magnetita	Casi todas las rocas ígneas
Hidróxidos	Metamórficas

Los minerales primarios silicatados adoptan formas diversas dependiendo de las estructuras químicas que los conforman. La estructura química básica de los minerales silicatados es el tetraedro, cuya fórmula es (SiO_4). En esta estructura el Silicio (Si) se encuentra en el centro de una estructura de cuatro puntas conformada por igual número de átomos de oxígeno (Figura 3).

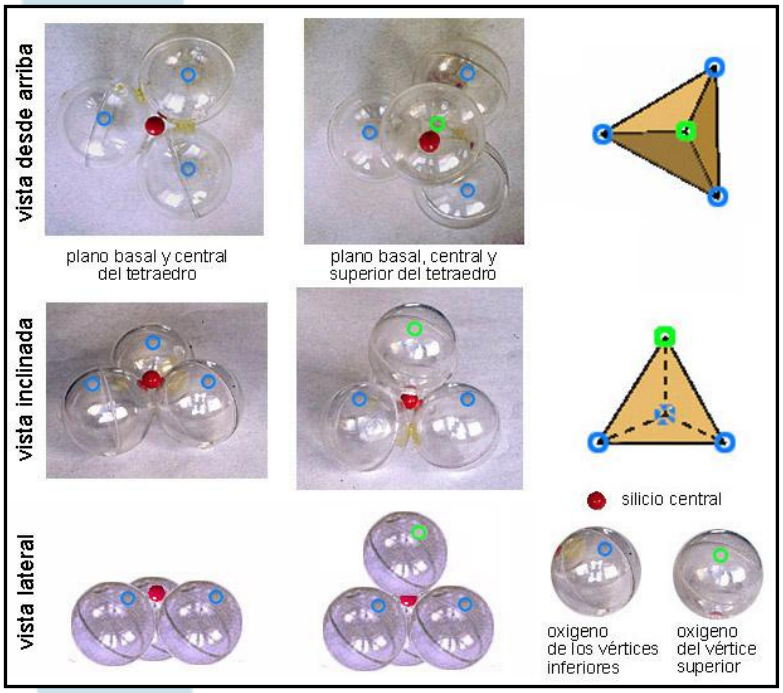

Figura 3. Ilustración de la estructura tetraédrica básica de los minerales silicatados.
Fuente: Curso de Química y fertilidad de Suelos Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, (2007).

La unión de la estructura tetraédrica básica con otros elementos, forma nuevas estructuras componentes de los minerales de las rocas. Estas estructuras pueden agruparse de la siguiente forma:

1. **Nesosilicatos:** Conformados por tetraedros independientes que se unen por puentes con un catión Independiente, lo que hace a la estructura muy débil y se pueda alterar con facilidad. Ejemplo el Olivino.

2. **Sorosilicatos:** Conformados por pares de tetraedros unidos por un vértice y que se enlazan con otros pares de cationes. Ejemplo la Hemimorfita.

3. **Ciclosilicatos:** Estructura en forma de anillo silicatado, producto de la unión cíclica de tetraedros. Ejemplo Berilo y Turmalina.

4. **Inosilicatos:** Son estructuras formadas por cadenas de tetraedros simples (piroxenos) y dobles (anfíboles). Ejemplo la Augita.

5. **Filosilicatos:** Estructura laminar donde la unión de los tetraedros y octaedros se da en capas superficiales. Son estructuras complejas de difícil alteración. Ejemplo las Micas.

6. **Tectosilicatos:** Estructura tridimensional de silicatos. Es una estructura muy fuerte ya que todos los oxígenos de los tetraedros se unen a los otros sin quedar ninguno libre. Ejemplo el cuarzo y los feldespatos. (Figura 4).

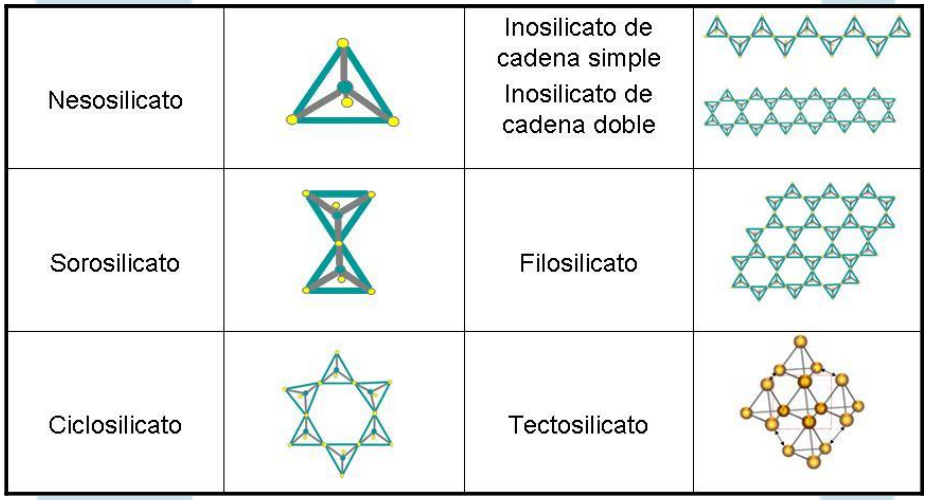

Figura 4. Estructura geométrica de los silicatos que componen los minerales primarios. Adaptado de Bohn *et al*., (2001).

Aunque los minerales silicatados constituyen casi el 95% de los minerales primarios presentes en las rocas, existen otros minerales como los óxidos, hidróxidos, sulfuros, sulfatos, fosfatos, entre otros; que van a constituir el material parental del suelo e influir sobre su fertilidad. Algunos de estos minerales son: La calcita, dolomita, fosforita, el yeso y la halita.

- **El Clima**

El clima es uno de los factores más determinantes en la formación de los suelos ya que constituye los agentes del intemperismo. La precipitación, la temperatura y el régimen de vientos, actúan de manera crucial en los procesos de transporte, descomposición, hidrólisis y fragmentación de las rocas y sus minerales componentes; así como en los procesos de descomposición, mineralización y humificación de la materia orgánica que va a formar parte de los coloides del suelo. La precipitación va a determinar la humedad del suelo y a jugar un papel crucial en los procesos de transformación de la materia orgánica. Una vez se formen las primeras capas del perfil del suelo, la disponibilidad de nutrientes dependerá del contenido de humedad. La temperatura permite incrementar la velocidad del proceso de fragmentación de las rocas y la formación de partículas texturales. Las zonas bajas cercanas al nivel del mar presentan suelos mas evolucionados y en su mayoría con texturas finas debido al proceso de transformación de arenas gruesas a arcillas, por acción de la temperatura.

La evapotranspiración potencial de una zona esta íntimamente relacionada con la temperatura, ya que a medida que se incrementa el calor se genera mayor cantidad de vapor de agua. El viento condiciona los procesos de transporte de materiales finos, también afecta el proceso de evapotranspiración potencial. La clasificación climática en zonas de vida de Holdridge (1979), es caracterizada por Espinel (1991) para Colombia, con base a los parámetros de precipitación, altitud y temperatura, como lo muestran los cuadros 3 y 4.

Cuadro 3. Zonas de vida para Colombia. Fuente: Espinel (1991).

ZONA DE VIDA		PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm)
NOMBRE	SIMBOLO	
Matorral desértico tropical	md - T	125 - 250
Monte espinoso tropical	me - T	250 - 500
Bosque muy seco tropical	bms - T	500 - 1000
Bosque seco tropical	bs - T	1000 - 2000
Bosque húmedo tropical	bh - T	2000 - 4000
Bosque muy húmedo tropical	bmh- T	4000 - 8000
Bosque pluvial tropical	bp - T	> 8000
Monte espinoso premontano	me - PM	250 - 500
Bosque seco premontano	bs - PM	500 - 1000
Bosque húmedo premontano	bh - PM	1000 - 2000
Bosque muy húmedo premontano	bmh - PM	2000 - 4000
Bosque pluvial premontano	bp - PM	> 4000
Bosque seco montano bajo	bs - MB	500 - 1000
Bosque húmedo montano bajo	bajo bh	1000 - 2000
Bosque muy húmedo montano	bmh - MB	2000 - 4000
Bosque pluvial montano bajo	bp - MB	> 4000
Bosque húmedo montano	bh - M	500 - 1000
Bosque muy húmedo montano	bmh - M	1000 - 2000
Bosque pluvial montano	bp - M	> 2000
Páramo subalpino	p - SA	> 500
Páramo pluvial subalpino	pp - SA	> 500
Tundra pluvial alpina	tp - A	> 500
Nival	N	-

Cuadro 4. Pisos altitudinales climáticos y su relación con la altitud y temperatura. Fuente: Espinel (1991).

PISO ALTITUDINAL	ALTITUD (m.s.n.m)	Biotemperatura (°C)
Tropical	0- 1000	> 24
Premontano	1000- 2000	18- 24
Montano Bajo	2000- 3000	12- 18
Montano	3000- 4000	6- 12
Subalpino	4000- 4500	3- 6
Alpino	4500- 4800	1.5- 3
Nival	> 4800	<1.5

- **Los Organismos**

El factor organismos, involucra los seres vivos que intervienen en el proceso de formación del suelo y su dinámica. La vegetación natural, la fauna y los microorganismos; aportan cantidad de sustancias de excreción y secreción con las que es transformado el material parental. Las relaciones simbióticas juegan un papel importante, como el caso de los líquenes (relación mutual entre hongo y alga) que secretan ácidos liquénicos capaces de generar reacciones químicas en la roca una vez colonizan su superficie. La acción de las semillas que se encuentran inmersas en las excretas de la fauna, permiten establecer organismos vegetales en materiales rocosos y suelos jóvenes, permitiendo acelerar su transformación.

Toda la biomasa inerte regresa al suelo en forma de necromasa para sufrir transformaciones por acción de organismos descomponedores como las bacterias y los hongos, facilitando así los procesos de mineralización (paso de moléculas orgánicas presentes en las células a moléculas inorgánicas que enriquecen al suelo de nutrientes) y humificación (reorganización y resíntesis de moléculas orgánicas de alto peso molecular) que incrementan la fertilidad del suelo, gracias a sus múltiples funciones. Los macro y microorganismos del suelo generan procesos de formación de estructura, recibiendo el nombre de “Ingenieros del ecosistema”. Las lombrices, hormigas y termitas producen pequeños túneles dentro del suelo, que facilitan la circulación de aire y agua en el perfil. Algunas bacterias secretan polisacáridos pegajosos que adhieren las partículas del suelo. Las hifas de los hongos envuelven las partículas de arena, limo y arcilla; generando agregados estables al agua y evitando así que el suelo se pierda por procesos erosivos. La figura 5, ilustra algunos macroorganismos que habitan el suelo.

El hombre como ser vivo juega un papel crucial en el desarrollo, manejo y transformación del suelo. Sin embargo, la intervención humana en este medio es de efecto regresivo, ya que desencadena procesos de degradación y desertificación mediante acciones tendientes a mejorar su calidad de vida y de aprovechamiento de los recursos naturales.

Figura 5. Macroorganismos presentes en el suelo.
Fuente: http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/03/25/62254

- **El relieve**

Este factor formador del suelo es uno de los más importantes cuando en una región cualquiera predominan los paisajes de fuertes pendientes. Se manifiesta como un factor que modifica la acción de otros factores, especialmente el clima y organismos, y de este último la vegetación. La diferencia de altitud determina variaciones de temperatura, la dirección de los vientos o indirectamente en la cantidad de precipitación en un lugar. Lo anterior repercute a su vez en el desarrollo y calidad de la vegetación (IGAC y CVC, 2004).

El relieve tiene una estrecha relación con la profundidad o espesor del suelo, el contenido de materia orgánica del horizonte superficial del perfil, el contenido de humedad de suelo y de sales y minerales solubles, así como la temperatura del suelo, el grado de alteración del material parental y lo más importante su fertilidad. Los procesos de transporte de materiales por acción del agua, el viento o la gravedad están condicionados por la longitud y gradiente de la pendiente del paisaje geográfico.

De esta forma existen zonas que han perdido, ganado o depositado materiales por acción del clima y la gravedad, y que son en mayor o menor forma susceptibles a procesos degradativos como la erosión y las remociones en masa. El cuadro 5, muestra el efecto de la longitud y gradiente de la pendiente sobre la erosión del suelo en zona cafetera colombiana.

Cuadro 5. Efecto de la longitud y gradiente de la pendiente del suelo, sobre los procesos de pérdida de suelo por erosión (promedio de 8 años) en Chinchiná Caldas (Colombia). Precipitación anual promedia de 2701 mm. Fuente: FEDERECAFE (1975).

EFECTO DEL GRADIENTE		EFECTO DE LA LONGITUD	
GRADIENTE (%)	PERDIDA DE SUELO ($t.ha^{-1}$)	LONGITUD (m)	PERDIDA DE SUELO ($t.ha^{-1}$)
23	119	5	152
43	327	10	207
		20	306

- **El tiempo**

La acción del tiempo dentro del desarrollo del suelo se refleja en sus características específicas. Se puede afirmar que el tiempo de formación determina el grado en el cual los demás factores alcanzan su máxima expresión. El tiempo cero o punto de partida en la formación de un suelo lo determina la iniciación de los procesos pedogenéticos (formación de la roca o material parental). (IGAC y CVC, 2004).

Sin embargo, el grado de evolución de un suelo no esta directamente ligado de forma cronológica al tiempo. Los suelos más antiguos no siempre son los más evolucionados, ya que esta relación puede discutirse con base a la cantidad de minerales intemperizables presentes en un momento dado. Un suelo será más viejo, cuanto menor sea la cantidad de minerales intemperizables, a menos que estos se hayan heredado de ciclos previos. Pero esta afirmación no es absoluta, puesto que es difícil encontrar suelos con pocos minerales alterables que no presentan perfil genéticamente desarrollado.

Conceptos clave:

El suelo esta en función de factores como: el material parental, el clima, los organismos, el relieve y el tiempo. El material parental, hace referencia a las rocas de las cuales se forma el suelo mediante distintos procesos. Las rocas son de tres tipos: ígneas, sedimentaria y metamórficas.

Recursos

Multimedia

1. Video: Gea y la Formación de las rocas partes 1, 2 y 3 (Instituto geológico y minero de España).

Enlace:

Parte 1:
http://www.youtube.com/watch?v=B8Y7S2ZwGNQ&feature=fvwrel

Parte 2:
http://www.youtube.com/watch?v=LHhp03XClXw&feature=related

Parte 3:
http://www.youtube.com/watch?v=5b4I3DI0IdM&feature=related

Resumen:
El video ilustra los procesos de formación de las rocas como materiales parentales del suelo, clasificación y principales minerales componentes.

2. Video:

Formación del Suelo

Enlace:

http://www.youtube.com/watch?v=iKdXSguOA5E&feature=related

Resumen:
El video expone algunos procesos de formación del suelo a partir de los materiales minerales de la roca madre y la adición de materia orgánica.

Lección 3. Impacto hidrológico y degradación del suelo.

El ciclo hídrico de una región y sus suelos, son componentes naturales que se encuentran estrechamente ligados. La formación histórica de algunos suelos que derivan de sedimentos y materiales transportados como piedras, gravas, arenas, limos y arcillas; se ha debido en gran medida al arrastre por acción de los ríos y lagunas. Los flujos de agua y sólidos en suspensión que presentan los ríos en las zonas medias y bajas de las cuencas hidrográficas, son en gran medida regulados por el uso y estado de los suelos de las zonas medias y altas, siendo muy importante la cobertura vegetal y en especial la diversidad arbórea y estratificación vegetal presente.

La degradación del suelo, según Rivera (2005) se define como la perdida de las condiciones normales en sus propiedades físicas, químicas y biológicas por acción natural o antrópica. La degradación natural, que no es muy grave, se debe a procesos lentos de pérdidas y ganancias debidas al desprendimiento de materiales por acción del agua, el viento o la gravedad. La degradación antrópica que es causada por acción del hombre y sus actividades productivas, genera mayores impactos en cortos periodos de tiempo. La erosión, compactación, contaminación, endurecimiento, acidificación, salinización, remoción masal y desertificación, son los principales procesos degradativos del suelo.

La erosión, que se define como el desprendimiento y arrastre superficial de las partículas constituyentes del suelo, está afectando según la FAO (2008) a casi el 20% de los suelos del mundo y a casi 1.500 millones de personas. En Colombia la realidad no es muy alentadora, según el Ideam

(2001) la erosión del suelo afecta 4.3 millones de hectáreas cultivables en forma severa y a 12.9 millones de hectáreas en forma moderada, constituyéndose en el proceso degradativo más importante.

Inadecuadas prácticas humanas, como la deforestación para la asignación de nuevas áreas de expansión agrícola, la excesiva mecanización, el inadecuado uso de agroinsumos, la ganadería extensiva en zonas de ladera, la agricultura en zonas de páramo y la quema de material vegetal se constituyen en los principales agentes causales de los procesos degradativos del suelo. De esta forma se vulnera la resiliencia del ecosistema para regular el recurso hídrico y se incrementan los impactos ambientales. La figura 6, ilustra el ciclo del agua en la naturaleza, se observa la importancia del suelo para regular el agua de escorrentía superficial y el agua que se infiltra a los mantos subterráneos.

Figura 6. Ciclo del agua en la naturaleza.
Fuente: http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html

La pérdida de cobertura vegetal en zonas altas de las cuencas hidrográficas por acción de la deforestación genera mayor desprendimiento y arrastre de los materiales constituyentes del suelo, ocasionando crecientes de las acequias y ríos en temporadas invernales. El uso de suelos de páramo (más de 3.200m de altitud) para cultivos tradicionales como la papa, genera impactos considerables sobre el recurso hídrico ya que estos suelos presentan características especiales de retención de humedad debido a su alta porosidad y contenido de materia orgánica.

La reducción de la evapotranspiración por causa de la deforestación, disminuye la capacidad del ecosistema de capturar el agua del suelo y la atmósfera, perdiendo potencial hídrico. De esta forma, se presentan en las zonas altas y medias de la cuenca hidrográfica procesos de remoción masal (causantes de deslizamientos) y crecida del caudal de los ríos por falta de regulación en la parte alta de la cuenca por parte de la vegetación natural, ocasionando catástrofes y pérdidas humanas. La figura 7, muestra las imágenes de alud de tierra causado por deslizamientos en zona rural del municipio de Copacabana Antioquia, como consecuencia de la zona invernal.

Figura 7. Imagen de alud de tierra causada por deslizamientos en época invernal, municipio de Copacabana Antioquia, en junio de 2011.

Fuente:http://www.eltiempo.com/colombia/medellin/riesgo-de-aludes-en-copacabana_9609625-4

En zonas bajas de la cuenca hidrográfica, donde existe la presencia de valles y sabanas, son frecuentes las inundaciones en la temporada invernal. La colmatación de los ríos por depositación de materiales sedimentarios arrastrados por el agua, adicionados al incremento del caudal normal, genera desvíos de los cauces e inunda los suelos aledaños caracterizados por una baja infiltración y alto contenido de arcillas. La figura 8, ilustra las inundaciones en zona rural del municipio de Ubaté Cundinamarca, como consecuencia de la temporada invernal.

Figura 8. Imágenes de inundaciones en el municipio de Ubaté Cundinamarca en junio de 2011.

Fuente: http://www.eltiempo.com/colombia/cundinamarca/prdidas-en-agricultura-en-cundimarca-por-invierno_9593224-4

Conceptos clave:
La degradación del suelo afecta de forma directa o indirecta la regulación del ciclo hidrológico de una región. Por esta razón, la conservación del suelo y la vegetación de cobertura en las zonas boscosas y selváticas, constituyen estrategias de prevención de riesgos ambientales como las inundaciones y deslizamientos.

Recursos

Multimedia

Video:

Problemática ambiental de la cuenca de Peribán Estado de Michoacán México.

Enlace:
http://www.youtube.com/watch?v=cuXY_3IUZ8I

Resumen:
Se aborda la problemática del agua de Peribán Michoacán, a través de la descripción de aspectos ambientales como la tala de bosques y establecimiento de cultivos a nivel industrial en zonas frágiles, lo que genera incremento de la erosión del suelo y pérdida del potencial hídrico de la región.

Lección 4. Perfil y composición del suelo.

Debido a que el suelo de una región es producto de factores y procesos de formación, como los mencionados anteriormente, las características observables como su forma, materiales presentes, color y espesor serán propios de la zona de estudio. La descripción de estas características a partir de una calicata (excavación poco profunda del suelo, de forma cúbica), se denomina estudio del perfil de suelo.

El perfil del suelo esta formado por la composición de sus horizontes (capas), las cuáles presentan procesos y materiales distintivos que dependen de algunas variables como el material de origen, el clima, la vegetación presente y el tipo de manejo.

Los horizontes más frecuentes del suelo se denotan con letras mayúsculas, como lo describe Jaramillo (2002):

Horizonte O: porción de suelo formada por materiales orgánicos, sin importar si se encuentran o no saturados de agua. En este horizonte los materiales minerales se pueden encontrar pero en cantidades mínimas que no representan gran porcentaje de su volumen.

Horizonte A: horizonte que se encuentra en la superficie del suelo o por debajo del horizonte O, si no se encuentran enterrados. Además presentan materia orgánica humificada que se encuentra haciendo parte de la estructura del suelo en complejos con los minerales constituyentes. Este horizonte tiene evidencia de actividades de disturbación como el laboreo, pastoreo, entre otras.

Horizonte E: horizonte mineral que se destaca por pérdida de minerales de arcilla o de óxidos de hierro y aluminio, por procesos de lixiviación. De esta forma se observa una alta acumulación de minerales de limo y arena, debajo de horizontes O u horizontes A, y encima de horizontes B. Se caracteriza por presencia de colores claros.

Horizonte B: Horizonte mineral que se encuentran por debajo de los horizontes descritos anteriormente. En este horizonte se ha perdido todo vestigio de la estructura original del material parental y se pueden observar algunos procesos como acumulación de arcillas, hierro, aluminio, humus, carbonatos, yeso y/o sílice; que se han traslocado de horizontes superiores.

Horizonte C: Horizonte que ha sido muy poco afectado por los procesos formativos del suelo. Se incluyen sedimentos, saprófitos y fragmentos rocosos poco consolidados que presentan baja a moderada resistencia a la excavación. Se incluyen porciones de suelo con acumulación de sílice, carbonatos y yeso, que no tienen relación con los horizontes superiores.

Horizonte R: Material parental rocoso, de difícil excavación con herramientas pero puede ser fragmentados con equipos pesados.

Dentro de la nomenclatura especifica de los horizontes que componen el perfil del suelo, suelen encontrarse letras minúsculas que describen algunos procesos específicos presentes, y que se denotan como subíndice de las letras mayúsculas. El cuadro 6, ilustra la nomenclatura de los procesos encontrados en los horizontes del suelo.

Cuadro 6. Significado de letras minúsculas dentro de la nomenclatura de los horizontes del perfil del suelo. Fuente: Aldana (2005).

LETRA	SIGNIFICADO
b	Horizonte de suelo enterrado
p	Horizonte arado
o	Horizonte de acumulación de materia orgánica
t	Acumulación de arcilla iluvial
w	Horizontes de alteración, reflejada por el alto contenido en arcilla in situ, color (rojo o pardo), estructura (edáfica, no de la roca original)
k	Acumulación de carbonatos secundarios
y	Acumulación de yeso
s	Acumulación de sesquióxidos.

Así entonces, podríamos encontrar un horizonte A_p que es un horizonte superficial que ha sido arado, o también un horizonte B_t que es un horizonte mineral que presenta acumulación de arcilla proveniente de horizontes superiores. La figura 9, ilustra algunos perfiles descritos mediante la nomenclatura de sus horizontes.

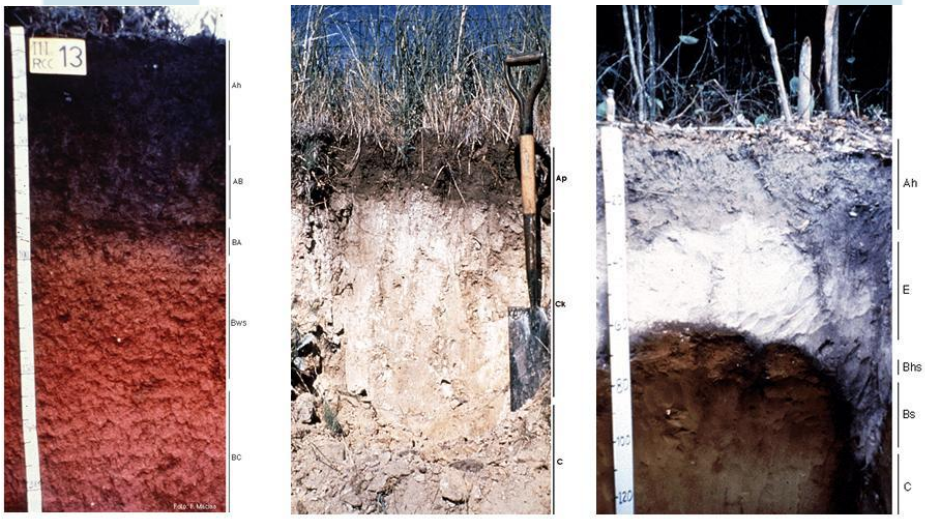

Figura 9. Ejemplos de descripción del perfil del suelo, mediante uso de nomenclatura de los horizontes.

Fuente: http://edafologia.ugr.es/introeda/tema01/perfil2.htm

¿Cuáles son las fases que constituyen el suelo?

El suelo como cuerpo natural, se encuentra en continuos procesos y dinámicas que le confieren su carácter sistémico. Está constituido por tres fases: fase sólida, fase líquida y fase gaseosa. La distribución porcentual de las tres fases va a depender de algunas condiciones propias como la textura, la densidad y el contenido de materia orgánica, así como de manejo por el hombre como el tipo de labranza y el riego.

Sin embargo, lo ideal para el suelo es que presente porcentualmente la mitad en fase sólida de la cuál la mayoría se constituya por minerales y al menos una décima parte se constituya de materia orgánica humificada. La otra mitad del suelo debe estar constituida por espacios porosos distribuidos equitativamente en espacios ocupados por agua y aire. La figura 10, ilustra la distribución porcentual ideal de las tres fases componentes del suelo:

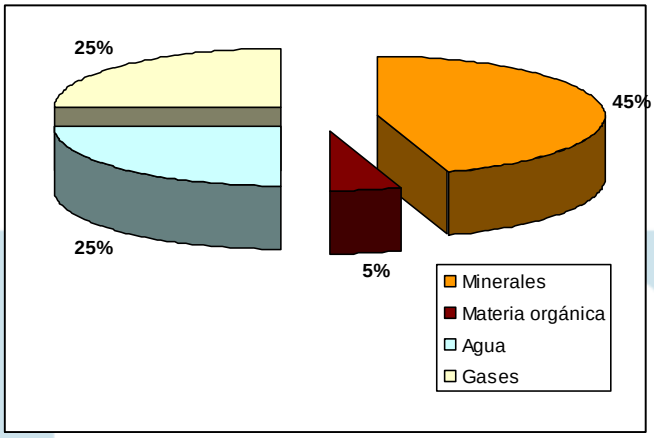

Figura 10. Distribución porcentual ideal de las tres fases constituyentes del suelo. Fuente: El autor.

- **La Fase sólida:**

La fase sólida del suelo está constituida por minerales y materia orgánica. Los minerales del suelo pueden ser primarios (aquellos derivados de la roca madre y que se han sedimentado, fragmentado, meteorizado o depositado para dar origen a materiales más pequeños como las gravas, arenas y limos), o secundarios como las arcillas y, los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio. La textura del suelo es el parámetro que describe la distribución de los materiales minerales en tres componentes básicos: arenas, limos y arcillas, como se verá mas adelante. De los componentes minerales, las arcillas sobresalen por su característica coloidal que le confiere buenas propiedades para retención de humedad e intercambio de iones al suelo con las raíces de las plantas.

La materia orgánica constituyente del suelo se puede dividir en materia orgánica viva y no viva. La materia orgánica viva son todos los organismos del suelo y las raíces de las plantas. La materia orgánica no viva, son por un lado los compuestos orgánicos en descomposición producto de la muerte de los organismos del suelo y la hojarasca que cae, y por otro, son los compuestos de carbono más estables como el humus. La materia orgánica del suelo es de gran importancia ya que interviene en distintos procesos como la retención de humedad, intercambio de iones y nutrientes, regulación del pH del suelo, fortalecimiento de la estructura y reducción de perdidas superficiales.

- **La Fase líquida:**

La fase líquida esta formada por el agua que ocupa los espacios porosos (capilares, poros, grietas, galerías) que se forman por el arreglo estructural del suelo y que es retenida por los coloides (arcillas y materia orgánica) en micro poros, o que circula libremente por poros más grandes formados por los limos y las arenas. Dentro del agua que contiene un suelo se encuentran diversos nutrientes que le proveen su fertilidad, y que son responsables de nutrir las plantas. Entre estos nutrientes se encuentran elementos de forma mayoritaria como: (K, N, P, Ca, Mg) y en menor cantidad (S, Fe, Mn, B, Mo, Cu, Zn, otros), los cuáles ingresan por los vasos conductores radicales siendo aprovechados por las plantas y los organismos del suelo.

- **La Fase gaseosa:**

La fase gaseosa del suelo esta constituida por el aire que entra en los espacios porosos desde la superficie y circula por el suelo. El aire que esta en el suelo tiene casi la misma composición del aire atmosférico, con aproximadamente 78% de N, 21% oxígeno y 1% de otros gases, entre los que se destaca el dióxido de carbono como producto metabólico de la respiración del suelo.

Esta fase es muy importante ya que afecta procesos como el intercambio térmico del suelo con la atmósfera y su refrigeración por ventilación, el intercambio de oxígeno para actividades metabólicas realizadas por los organismos del suelo y las raíces de las plantas, liberación de gases como el dióxido de carbono, óxido nitroso y metano; así como proveer el nitrógeno atmosférico (N_2) para la fijación biológica de este elemento por bacterias de vida libre del suelo, y por acción de simbiosis entre las raíces de las plantas y bacterias del género *Rizobium spp*.

Conceptos clave:

El perfil del suelo es la composición transversal del arreglo de sus horizontes. Los horizontes del suelo, son las capas diferenciadas que lo componen. Los horizontes pueden clasificarse como horizontes: O, A, B, C y R.

El suelo es un cuerpo natural que presenta tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La distribución porcentual de cada una de las fases va a depender de algunas condiciones propias como la textura, la densidad y el contenido de materia orgánica, así como de manejo por el hombre como el tipo de labranza y el riego.

Recursos:

Página web:

Lección 1: El suelo: Concepto y formación (Departamento de edafología de la Universidad de Granada España).

Enlace:
http://edafologia.ugr.es/introeda/tema01/perfil2.htm

Video:

El perfil del suelo. Centro regional Santa fe – Recurso lechero. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Enlace:
http://www.youtube.com/watch?v=Z1D_6t34NR4

Resumen:
Características del perfil de los suelos de la provincia de Santafé Argentina, descripción de los materiales parentales, factores de formación e importancia del recurso para la producción agropecuaria.

Lección 5. Clasificación de suelos.

El suelo de acuerdo a sus características formativas y de manejo, puede clasificarse con base a estándares establecidos por sistemas taxonómicos internacionales como los propuestos por la FAO o la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) mediante la (Soil Survey Staff, 1999). En este tipo de clasificación se utilizan órdenes, subórdenes, grandes grupos, subgrupos y familias, siendo esta última la más precisa. Sin embargo, la clasificación por ordenes es ya bastante detallada, ya que entre ordenes de suelos se encuentran diferencias marcadas. Existen 12 tipos de órdenes de suelo, descritos por la USDA: Alfisol, Andisol, Aridisol, Entisol, Espodosol, Gelisol, Histosol, Inceptisol, Mollisol, Oxisol, Ultisol y Vertisol. Malagón (2004) citado por Posada (2010), distribuye el grado de evolución de los órdenes de suelo de acuerdo a una escala numérica de 0 a 5, como lo muestra la figura 11.

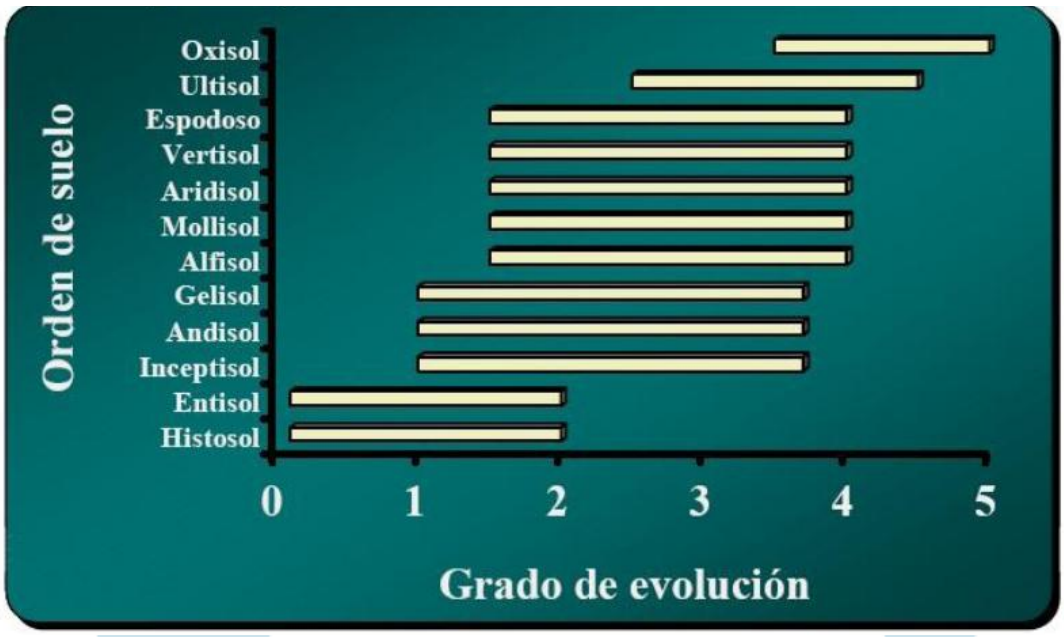

Figura 11. Grado de evolución de los suelos. Fuente: Malagón (2004) citado por Posada (2010).

Se puede apreciar a los histosoles como los menos evolucionados, ya que son derivados de materiales orgánicos que han sido acumulados por su bajo proceso de degradación (suelos de zonas inundadas, de páramos y tundras). Los oxisoles por el contrario tienen mayor grado de evolución, presentando características particulares como su baja fertilidad y altos contenidos de minerales de óxido de hierro y aluminio.

Descripción de los órdenes de suelo.

Jaramillo (2002) describe los 12 órdenes de suelo de la siguiente forma:

Entisol: Los Entisoles son suelos derivados de fragmentos de roca suelta, que están formados típicamente por arrastre y depósito de materiales sedimentarios que son transportados por la acción del agua. Son suelos jóvenes y sin horizontes genéticos naturales.

Inceptisol: Los inceptisoles son suelos con características poco definidas al igual que sus horizontes. En zonas de clima frío, se presenta acumulación de materiales orgánicos en la superficie debido a condiciones de baja degradación. Presentan un pH ácido, malas condiciones de drenaje y pueden contener minerales de arcilla amorfa como la alófana. Estos suelos ocupan gran parte de las laderas de Colombia, teniendo un desarrollo a partir de rocas recientemente expuestas.

Histosol: Los histosoles son suelos orgánicos que presentan un horizonte O bastante profundo, gracias a la acumulación de tejidos de plantas que no han sufrido procesos de descomposición por condiciones de baja temperatura y alta humedad. Estos suelos se encuentran saturados de agua al menos una vez por año, y se pueden encontrar en el territorio colombiano en zonas de páramo

corriendo el riesgo de uso para fines agrícolas por su uso como sustrato orgánico. De estos suelos depende en gran medida la regulación hídrica de los páramos y el abastecimiento de agua en nuestro país.

Andisol: Los andisoles son suelos derivados de cenizas volcánicas. Presentan excelentes propiedades físicas, sobre todo de drenaje, así como buena fertilidad gracias a la acumulación superficial de materia orgánica humificada y a la presencia de la arcilla alófana. Estos suelos se encuentran en la zona andina, sobre todo hacia los departamentos de Caldas, Quindío y Risaralda, así como hacia la zona suroccidental del país en los departamentos del Cauca, Nariño y Putumayo. Son los responsables de la producción cafetera en nuestro país y por esto su gran importancia.

Alfisol: Los alfisoles son suelos típicos de zonas con cambios estacionales entre (húmedo a semiárido), con déficit de humedad de más de cinco meses al año. Poseen buen contenido de cationes intercambiables, pero alta susceptibilidad a los procesos de degradación. Presentan un horizonte superficial de color claro con bajo contenido de materia orgánica. Se encuentran en la Región del Caribe, especialmente en los departamentos de Magdalena y Bolívar y en los valles Interandinos del Magdalena y del Cauca.

Molisol: Los molisoles son suelos de color oscuro, con altos contenidos de materia orgánica. Son los suelos más fértiles ya que se encuentran en zonas cálidas de valles, con altos contenidos de arcillas y buena cantidad de cationes que forman bases y sales nutritivas para las plantas. Presentan texturas pesadas debido a condiciones de mecanización continua lo que los hace susceptibles a procesos de compactación. Son suelos muy productivos en el Valle del Cauca y la zona Caribe como la región del bajo Sinú.

Vertisol: Los vertisoles son suelos fértiles gracias a su alto contenido de arcillas. Sin embargo, debido a la presencia de arcillas expandibles de tipo 2:1 como la montmorillonita y la vermiculita, presentan condiciones de agrietamiento en verano y de alta plasticidad en invierno, ocasionando inundaciones por su baja infiltración. Representan suelos muy inestables para la construcción de obras civiles. En los Vertisoles el principal cultivo es el arroz bajo inundación, o arroz de secano durante la estación lluviosa.

Oxisol: Los oxisoles son suelos ricos en sesquióxidos de hierro y aluminio con predominio de arcillas de tipo 1:1. Son suelos meteorizados y de baja fertilidad. Presentan un pH ácido y baja retención de humedad, lo que puede limitar el crecimiento de las plantas por estrés. Se encuentran en la región de la Orinoquía, los Llanos orientales y la Amazonía, y acorde a las diferentes condiciones ambientales requieren manejos diferentes.

Ultisol: Los ultisoles son suelos más jóvenes que los oxisoles, sin embargo presentan características similares como la alta intemperización, colores rojizos y pardos por presencia de sesquióxidos de hierro y aluminio. Presentan un horizonte de acumulación de arcillas y bajo contenidos de bases minerales, lo que los hace poco fértiles para la agricultura.

Gelisol: Los gelisoles son suelos que presentan condiciones de congelamiento durante periodos largos de tiempo, presentando o no hielo en superficie. Son los suelos característicos de los polos y de zonas muy altas glaciares.

Espodosol: Los espodosoles son suelos que presentan un horizonte oscuro de acumulación de materia orgánica y alto contenido de aluminio, con o sin hierro, que se ubica por debajo de un horizonte mas claro que ha aportado aquellos elementos metálicos. Presentan un pH ácido y baja fertilidad.

Aridisol: Los aridisoles son suelos presentes en zonas muy secas y áridas, con muy bajas precipitaciones y alta evapotranspiración. Por esta condición, los aridisoles presentan altos contenidos de sales de calcio y magnesio, como también carbonatos y bicarbonatos de sodio. En Colombia están presentes en la parte alta de la región caribe, en el departamento de la Guajira, donde las precipitaciones están por debajo de los 500 mm anuales (Malagón, 2003).

La figura 12, ilustra los perfiles de algunos órdenes de suelo y sus características morfológicas.

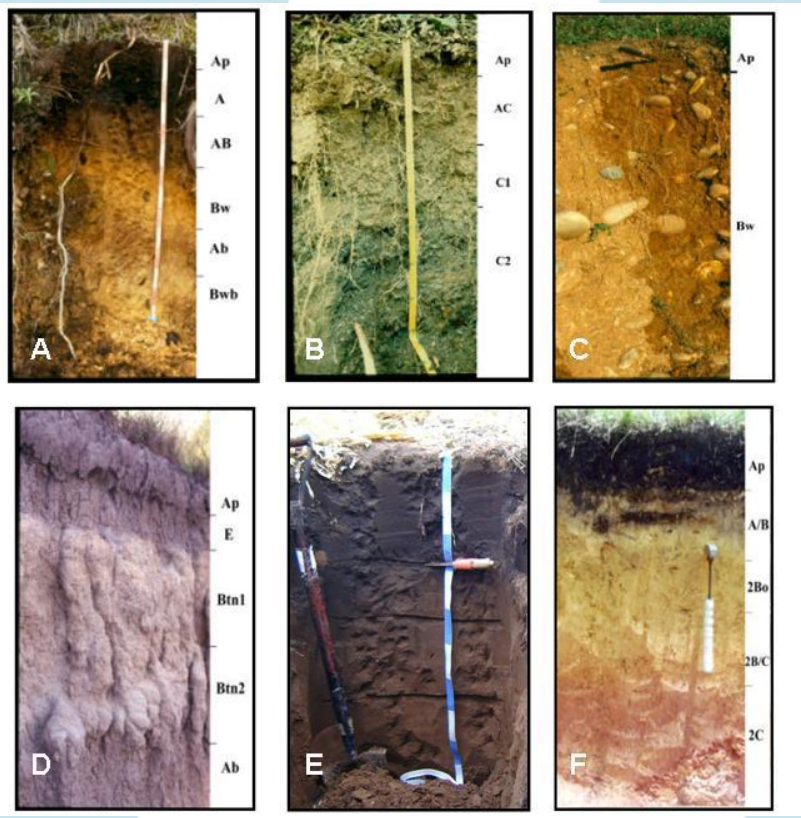

Figura 12. Algunos órdenes de suelo y sus características morfológicas. (A) Andisol, (B) Entisol, (C) Inceptisol, (D) Alfisol, (E) Molisol y (F) Oxisol. Fuente: Jaramillo (2002).

Conceptos clave:

Los suelos pueden clasificarse según sus características diferenciadas. La clasificación general de la USDA, alberga los siguientes órdenes: Alfisol, Andisol, Aridisol, Entisol, Espodosol, Gelisol, Histosol, Inceptisol, Molisol, Oxisol, Ultisol y Vertisol.

Recursos:

Lectura sugerida:

Malagón D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos - énfasis en génesis y aspectos ambientales. Publicado en Revista académica Colombiana de la Ciencia, Volumen 27, No. 104: 319-341.

Disponible en:
http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_27/104/319-341.pdf

CAPITULO 2. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL SUELO

Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo definen su calidad y aptitud para las distintas actividades socioeconómicas que desarrolla la humanidad. La interacción entre las propiedades del suelo genera otras propiedades emergentes como la fertilidad, salud y resiliencia. El contenido de materia orgánica del suelo es el factor que más afecta todas sus propiedades, y en gran medida le proporciona protección ante amenazas externas como los contaminantes. La textura, define la distribución del tamaño de las partículas del suelo (arenas, limos y arcillas) e influye directamente sobre el movimiento del agua en el suelo. En éste capitulo, se describen las principales propiedades del suelo, su función y los indicadores de calidad que definen su estado y posibles manejos.

Lección 6. Indicadores de calidad del suelo.

Como se definió en la lección 1, el suelo es un sistema vivo, por lo tanto los indicadores biológicos y las condiciones favorables para el establecimiento de la vida en el suelo, son los aspectos más importantes para definir su calidad. Sánchez de Prager (2007) define la calidad del suelo como su capacidad de asegurar las condiciones y disponibilidad de nutrientes requeridos para producir cultivos sanos y nutritivos de una manera sostenible a largo plazo, sin impactar los recursos naturales o dañar el ambiente, reflejada en salud, bienestar y calidad de vida.

Según la taxonomía general, los suelos que presentan mejores características de calidad, son los de los órdenes Molisol, Andisol y Vertisol. El contenido de materia orgánica es quizá el indicador más importante de calidad del suelo, ya que afecta en gran medida sus demás propiedades. El contenido de arcilla en el suelo, indica propiedades de fertilidad y disponibilidad de nutrientes para las plantas gracias a sus propiedades coloidales que le permiten intercambiar elementos con las raíces y retener la humedad.

Los altos contenidos de elementos tóxicos como los metales pesados Pb, Hg y Cd en concentraciones por encima de los límites máximos permisibles según la normatividad, indican condiciones no deseadas que afectan la calidad del suelo. La contaminación por manejo del suelo

agrícola como por ejemplo la adición de sustancias tóxicas como los herbicidas y plaguicidas derivados de compuestos organoclorados y organofosforados, la extrema acidez que causa liberación y toxicidad por Aluminio intercambiable, el alto contenido de sales y sodio intercambiable, la presencia de esporas de microorganismos fitopatógenos como los géneros Fusarium *spp*. y *Phytophthora spp*., la presencia de bacterias patógenas como las coliformes fecales y las del género Salmonella *spp*.; hacen que la productividad, fertilidad y salud del suelo como propiedades emergentes y condicionantes de calidad, se encuentren en riesgo. El derrame de crudo en zonas de extracción petrolera y poliductos, genera impactos negativos al suelo debido a su alta toxicidad y permanencia, afectando su calidad.

Desde el punto de vista de las condiciones del suelo, una baja densidad aparente, alta infiltración, alta porosidad, textura franca, baja resistencia a la penetración, buena profundidad efectiva para el desarrollo de las raíces, y agregación granular; son condiciones ideales de calidad.

Posada (2010) agrupa algunas propiedades clave del suelo, como las mecánicas, hidrológicas, térmicas, biológicas y químicas; con miras a definir su calidad. El cuadro 7, ilustra la interacción de las propiedades del suelo como atributos de calidad.

Cuadro 7. Algunos indicadores de calidad del suelo, según sus propiedades y algunas variables de medición. Adaptado de Posada (2010).

Propiedad	Variable	Indicador de Calidad
Mecánica	Textura	Texturas Francas, en especial Franco arcillosa
	Estructura	Estructura granular
	Porosidad	Alta porosidad (por encima del 50%)
	Retención de humedad	Alta retención de humedad, evitando encharcamientos
	Drenaje	Buen drenaje (alta tasa de infiltración)
Térmica	Color	Color oscuro
	Conductividad térmica	Alta conductividad y distribución del calor latente
Biológica	Contenido de Materia orgánica	Alto contenido (por encima del 5%)
	Macroorganismos	Diversidad, en especial de: lombrices, termitas y hormigas
	Microorganismos	Diversidad de organismos (hongos, bacterias y actinomicetos)
	Reserva de nutrientes	Presencia de residuos frescos (hojarasca y heces fecales)
	Microorganismos fitopatógenos	Baja o nula presencia
Química	pH	Neutro (entre 6.6 y 7.3)
	acidez	Baja acidez y bajos contenidos de Al intercambiable
	Alcalinidad	Baja alcalinidad y bajos contenidos de Na intercambiable
	Elementos metálicos pesados	Muy bajos o nulo
	CIC	Alta capacidad de intercambio de nutrientes

Desde el punto de vista de los aspectos degradativos, se entiende por “suelo de calidad” como aquel que presenta únicamente evidencia de degradación natural, como la que normalmente causa el agua y el viento sin la intervención del hombre. Sin embargo, existen prácticas dentro de la

agricultura que permiten reducir significativamente los procesos de degradación del recurso suelo, permitiendo acercar el sistema agrícola a lo que ocurre en el sistema natural.

La Agroecología como ciencia en construcción, se encarga del estudio de los agroecosistemas desde el punto de vista de su sustentabilidad, y trata de dar explicaciones científicas a las bondades de la agricultura tradicional (de indígenas, negritudes y campesinos tradicionales) que han tenido éxito en el mundo. Así por ejemplo, prácticas como el uso de abonos orgánicos, policultivos, coberturas vegetales, agroforestería, y manejo integrado de plagas; generan procesos de interacción que mejoran algunas propiedades del suelo y aumentan su calidad.

Conceptos clave:

La calidad del suelo es una propiedad emergente que depende de otras como su fertilidad, salud, resiliencia y productividad. Un suelo sano se caracteriza por albergar la diversidad biológica y poseer altos contenidos de materia orgánica.

Recursos:

Lectura sugerida:

Bautista A., Etchevers J., Del Castillo R., Gutiérrez C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. Publicado en Revista Ecosistemas, No. 2. 10p.

Disponible en:
http://redalyc.uaemex.mx/pdf/540/54013210.pdf

Lección 7. Propiedades físicas del suelo (Estructura, textura, Color, densidad y porosidad)

Las propiedades del suelo que están directamente relacionadas con su forma, tamaño, color, temperatura, textura, humedad, porosidad y densidad, y que además pueden ser evaluadas mediante magnitudes físicas internacionales, se denominan propiedades físicas del suelo. En esta lección entraremos a estudiar los conceptos básicos de las principales propiedades físicas del suelo con el fin de crear bases teóricas para el desarrollo de problemas donde sean incluidas estas propiedades.

- **La estructura del suelo**

El arreglo estructural del suelo esta íntimamente ligado al porcentaje, tipo y distribución de los componentes de su fase sólida, como los minerales y la materia orgánica. Este arreglo de las partículas del suelo forma lo que se denomina la estructura y agregación del suelo. Sin embrago, la

estructura está en gran medida ligada a otras propiedades como la textura, el régimen de humedad y la densidad, así como a factores externos como la labranza o el pastoreo. Jaramillo (2002) describe los distintos tipos de estructura, así:

Estructura esferoidal: Estructura redondeada, puede ser migajosa y granular. Está asociada a horizontes con altos contenidos de materia orgánica, en suelos de orden mollisol y andisol. Los complejos arcillo humus forman este tipo de estructura, que es óptima para la agricultura.

Estructura en bloques: Predominan terrones duros en suelos con altos contenidos de arcilla o de óxidos de hierro y aluminio. Son comunes en suelos alfisoles u oxisoles.

Estructura prismática: Estructura asociada a suelos poco evolucionados donde se forman planos rectos que evidencian los horizontes minerales. Es común encontrarla en suelos inceptisoles.

Estructura columnar: Estructura en forma de columnas que se forman por la disgregación de los sólidos gracias a la acción del sodio intercambiable, que hace que las partículas de arcillas se expandan y pierdan cohesión entre ellas. Es común encontrarlos en suelos salinos y aridisoles**.**

Estructura laminar: Estructura que implica poca evolución de los materiales parentales del suelo. En muchas ocasiones aflora la roca madre en el horizonte C, así como rocas sedimentarias o metamórficas. Es frecuente encontrarlos en inceptisoles y ultisoles.

Estructura cuneiforme: Estructura relacionada con altos contenidos de arcilla expansiva de tipo 2:1, que presenta formas de cuña y estrías en superficie en temporadas secas. Los procesos de expansión y contracción, son característicos en estas estructuras. Se encuentran típicamente en suelos vertisoles.

Estructura biológica (bioestructura): Estructura ligada a procesos biológicos, donde las raíces, los macro y microorganismos generan arreglos de los materiales del suelo. Un ejemplo es la bioestructura formada por las heces de las lombrices de tierra, así como la generada en las raíces de algunas plantas que presentan simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno y con hongos micorrícicos.

La figura 13 ilustra las formas de algunos arreglos estructurales. Nótese la estructura que pueden formar las raíces de las plantas y las heces fecales de las lombrices de tierra.

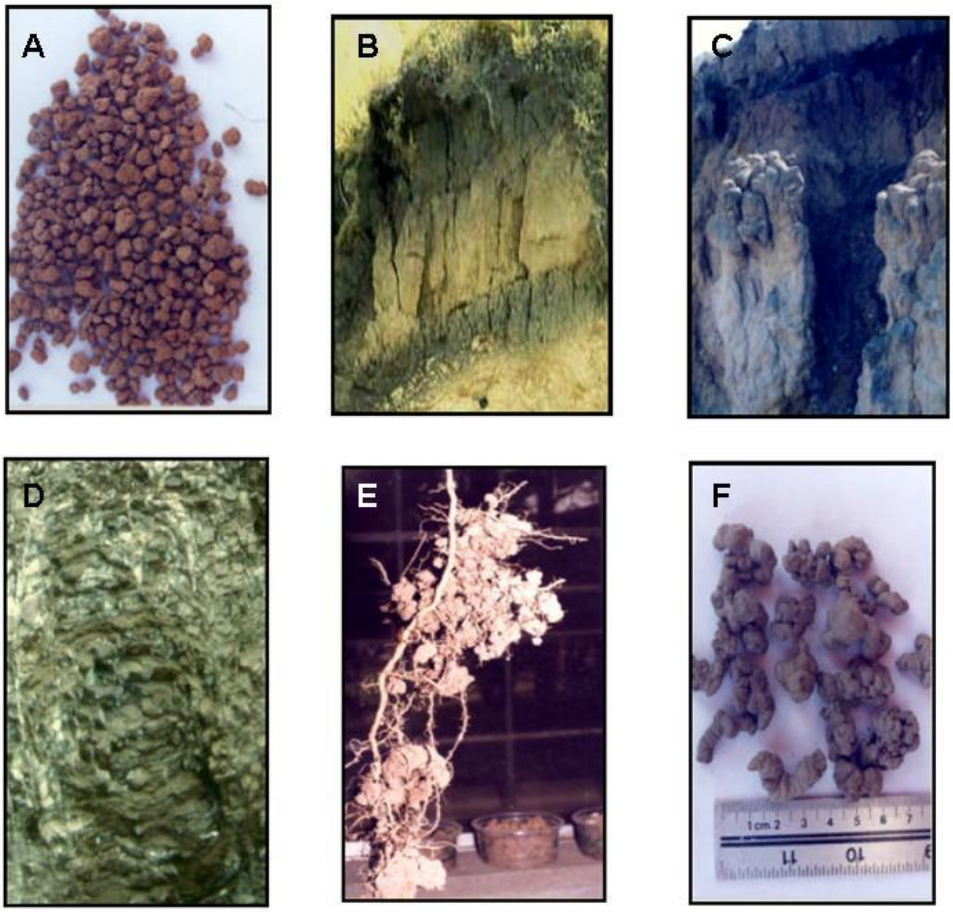

Figura 13. Algunas formas de estructura del suelo. (A) Bloques, (B) prismática, (C) Columnar, (D) Laminar, (E) bioestructura formada por raíz, (F) bioestructura formada por lombrices. Fuente: Jaramillo (2002).

- **La textura del suelo**

La textura es una propiedad física del suelo que establece las cantidades y distribución de las partículas que lo componen, en tamaños menores de 2mm. Estas partículas se agrupan en tres tipos: Arena (A), Limo (L) y Arcilla (Ar). La USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), ha realizado una categorización de los tamaños de partícula para cada uno de los grupos, según su diámetro. Las arenas se encuentran en un rango entre (0.05 y 2 mm), los limos entre (0.002 y 0.05 mm) y las arcillas menores a 0.002 mm; siendo este último valor definido según propiedades coloidales distintivas encontradas.

El cuadro 8, muestra una división mas precisa de las partículas del suelo, de acuerdo al tamaño del diámetro.

Cuadro 8. Clase de partícula componente del suelo, de acuerdo al tamaño de su diámetro. Las mediciones se realizan en mm (10^{-3} m) y µm (10^{-6} m). Fuente: Jaramillo (2002).

Clase de partícula	Tamaño del diámetro de la partícula	
	mm	µm
Arena muy gruesa	2 -1	2000 - 1000
Arena gruesa	1 - 0.5	1000 - 500
Arena media	0.5 - 0.25	500 - 250
Arena fina	0.25 - 0.1	250 - 100
Arena muy fina	0.1 - 0.05	100 - 50
Limo grueso	0.05 - 0.02	50 - 20
Limo medio	0.02 - 0.005	20 - 5
Limo fino	0.005 - 0.002	5 - 2
Arcilla gruesa	0.002 - 0.0002	2 - 0.2
Arcilla fina	< 0.0002	< 0.2

La clase textural, es la característica que describe la composición del suelo de acuerdo a las proporciones de arenas, limos y arcillas. Existen 12 clases texturales: Arenosa, Arenosa franca, Franco arenosa, Franca, Franco limosa, Limosa, Franco arcillo arenosa, Franco arcillosa, Franco arcillo limosa, Arcillo arenosa, Arcillo limosa, Arcillosa.

Cada clase textural tiene un rango de proporciones de los tres tipos de partículas. La definición de la clase textural se realiza mediante el triángulo de texturas, después de haber obtenido los valores correspondientes a las tres partículas mediante análisis de laboratorio, como las pruebas de la Pipeta y del hidrómetro, descritas por Jaramillo (2002). La Figura 14, ilustra el triangulo de texturas que clasifica el suelo en 12 clases.

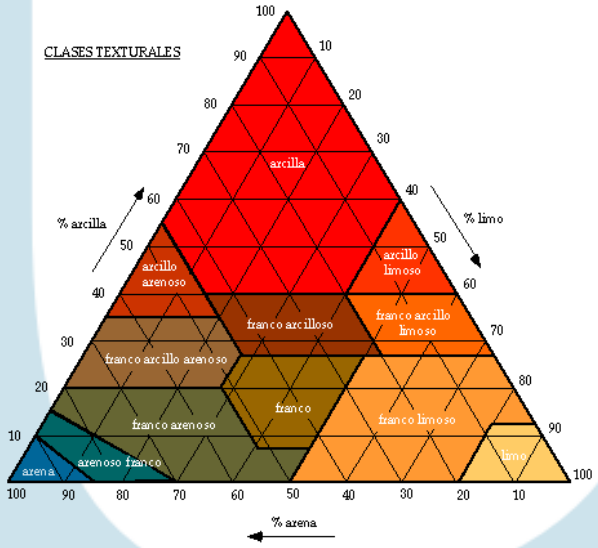

Figura 14. Triángulo textural del suelo. La definición de la clase textural se realiza de acuerdo al análisis de laboratorio cuyos resultados se expresan en porcentaje de arenas, limos y arcillas. El triangulo de textura permite definir la clase textural mediante la asignación de las tres variables.
Fuente: http://edafologia.ugr.es/introeda/tema04/text.htm#anchor618597

De acuerdo a la figura podemos observar que un suelo que presente un 30% de arcillas, 60% de arenas y 10% de limos; tendrá una clase textural Franco arcillo arenosa. De igual manera, un suelo que presente un 35% de arcillas, 40% de arenas y 25% de limos; tendrá una clase textural Franco arcillosa. Las texturas Francas, en especial las Franco arcillosas son las ideales para la agricultura, ya que presentan valores equilibrados de los tres tipos de partículas, generando ventajas comparativas en otras propiedades del suelo.

- **El color del suelo**

El color es una de las propiedades físicas más notorias del suelo. Aunque es una característica cualitativa, existen formas de determinar los matices, la claridad y los cromos del suelo; mediante el uso de tablas comparativas de referencia llamadas tablas de MUNSELL. Los colores del suelo indican procesos formativos y tipos de materiales presentes.

Los colores oscuros en los horizontes superiores del suelo indican buenos contenidos de materia orgánica, debido a la formación de complejos de humus y arcilla en la estructura. Un suelo con un color oscuro puede retener mayor cantidad de la energía radiante del sol mejorando los procesos térmicos e incrementando su actividad biológica. Suelos con bajos contenidos de materia orgánica y colores oscuros, pueden indicar complejos entre el humus y óxidos de hierro, carbón u óxido de manganeso.

Los colores rojos en los suelos, indican buenas condiciones de drenaje y ventilación así como alto grado de meteorización y la presencia de minerales de óxido de hierro y aluminio. Generalmente estos colores son encontrados en los suelos de ladera de Colombia, la zona andina y los llanos orientales.

Los colores grises a blancos, reflejan la presencia de contenidos importantes de cuarzo, caolinita u otras arcillas silicatadas, carbonatos de calcio o magnesio, yeso y sales; indicando en la mayoría de los casos mal drenaje y bajos contenidos de coloides como la arcilla y el humus.

Los suelos grisáceos, indican condiciones anaeróbicas debidas a épocas de anegamiento o niveles freáticos muy elevados. Los moteos en el suelo (diversos colores) indican condiciones de mal drenaje, presentándose particularmente en suelo de textura arcillosa.

- **La densidad y porosidad del suelo**

La densidad es una propiedad física de las sustancias, que indica la razón que existe entre su masa y el volumen que ocupa en el espacio. El suelo por ser un cuerpo poroso y estar constituido por tres fases, como vimos anteriormente, presenta dos condiciones de densidad: densidad real y densidad aparente.

La densidad real, es la razón entre la masa de suelo seco y el volumen de los sólidos del suelo. De ésta forma, no se tiene en cuenta el volumen que ocupan los espacios porosos ni tampoco la humedad que tiene el suelo. Existen metodologías de laboratorio para estimar la densidad real del suelo como la técnica del Picnómetro. Los valores de la densidad real del suelo, van a depender de las densidades individuales de los minerales componentes. Así por ejemplo el cuarzo, tiene una densidad real de 2.6 $g.cm^{-3}$, la arcilla montmorillonita tiene una densidad real de 2.4 $g.cm^{-3}$, la calcita de 2.8 $g.cm^{-3}$ y la hematita de 4.9 $g.cm^{-3}$, siendo un material bastante pesado.

La densidad aparente, es la razón entre la masa del suelo seco y el volumen total del suelo (volumen de sólidos más volumen de espacios porosos), es decir que tiene en cuenta el arreglo estructural del suelo. Existen metodologías de laboratorio para estimar la densidad aparente del suelo, como las técnicas del cilindro biselado y la del terrón parafinado. La densidad aparente del suelo, es un parámetro muy importante, ya que permite hacer estimaciones del peso de la capa arable de un suelo, el cálculo del contenido de nutrientes presenten en el suelo posterior al análisis químico, el grado de compactación de un suelo y el contenido de espacios porosos en compañía de su densidad real. Entre menor sea el valor de la densidad aparente del suelo, mejores son algunas de sus propiedades. Los suelos pesados, es decir con altos contenidos de arcillas y pocos espacios porosos, presentan densidades aparentes entre 1.6 y 1.9 $g.cm^{-3}$, haciéndolos poco aptos para la agricultura. Por el contrario, los suelos con densidades aparentes cercanas a la unidad, indican presencia de buenos niveles de materia orgánica, lo que los hacen ideales para la agricultura.

La porosidad de un suelo, es el volumen de éste que no se encuentra ocupado por sólidos que componen su textura o materiales orgánicos. Existen dos tipos principales de poros en el suelo: micro poros y macro poros. Los microporos o poros pequeños, se deben a la distribución de las partículas básicas componentes del suelo, por los que se llaman poros texturales. Los macro poros, o poros grandes, se deben al arreglo estructural del suelo y constituyen los poros por donde circula grandes flujos de agua y aire. En los microporos se encuentra el agua retenida por acción de los coloides (arcilla y materia orgánica humificada), y es la que enriquece la solución del suelo, con fines de proveer nutrientes a las plantas.

La porosidad de un suelo se puede calcular a partir de la densidad real y densidad aparente del mismo, así:

$$P = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) x\,100$$

Donde P es el porcentaje de porosidad del suelo, Da es la densidad aparente del suelo en ($g.cm^{-3}$) y Dr es la densidad real del suelo en ($g.cm^{-3}$). Los valores obtenidos de porosidad, van a depender de las características propias y proporción de los materiales componentes del suelo así como de su manejo.

El cuadro 9, indica la clasificación del suelo según su porosidad. Nótese que valores de porosidad por debajo del 40% son considerados bajos ya que el flujo de gases y agua por los espacios porosos se vuelve deficiente e inadecuado para la vida del suelo.

Cuadro 9. Clasificación de un suelo según su porcentaje de porosidad total. Fuente: Kaurichev (1984).

Porosidad total (%)	Clasificación
> 70	Excesiva
55 - 70	Excelente
50 - 55	Satisfactoria
40 - 50	Baja
< 40	Muy baja

Conceptos clave:

Las propiedades del suelo que están directamente relacionadas con su forma, tamaño, color, temperatura, textura, humedad, porosidad y densidad, y que además pueden ser evaluadas mediante magnitudes físicas de patrones internacionales, se denominan propiedades físicas del suelo.

Recursos:

Página web:

Departamento de Edafología de la Universidad de Granada España.

Enlace:

http://edafologia.ugr.es/introeda/tema04/text.htm#anchor618597

Lección 8. Humedad, infiltración, permeabilidad, Consistencia y profundidad efectiva del suelo.

- **La Humedad del suelo**

La humedad del suelo esta constituida por la cantidad de agua que ocupa los espacios porosos. Esta propiedad esta íntimamente relacionada con la textura del suelo, el contenido de materia orgánica, el arreglo estructural y algunas condiciones de la zona como el régimen de lluvias, el riego y la evapotranspiración potencial.

La presencia de texturas gruesas, indican mayor cantidad de macro poros que no pueden retener el agua del suelo y que permiten que esta se infiltre hasta los mantos freáticos. Las texturas finas presentan micro poros, que por el contrario, pueden retener con mayor fuerza la humedad del suelo,

permitiendo el aprovechamiento por parte de los organismos y las raíces de las plantas. La materia orgánica del suelo gracias a sus propiedades coloidales y alta porosidad, puede retener gran cantidad de humedad, de allí su gran importancia.

El agua en el suelo esta retenida en los micro poros mediante tensiones ejercidas por las capas de los coloides. De esta manera ser puede establecer algunos estados de retención: capacidad de campo (agua retenida entre 0.1 y 0.3 bares, y en equilibrio con la fuerza ejercida por la gravedad), punto de marchitez permanente (agua retenida a 15 bares, que es poco aprovechada por las plantas), agua residual (agua retenida a 30 bares, que hace parte del suelo pero que no esta disponible para las plantas). El agua aprovechable (A.A) se encuentra entre el punto de marchitez permanente (P.M.P.) y la capacidad de campo (C.C.) del suelo. La figura 15, muestra como es retenida el agua en distintos tipos de suelo.

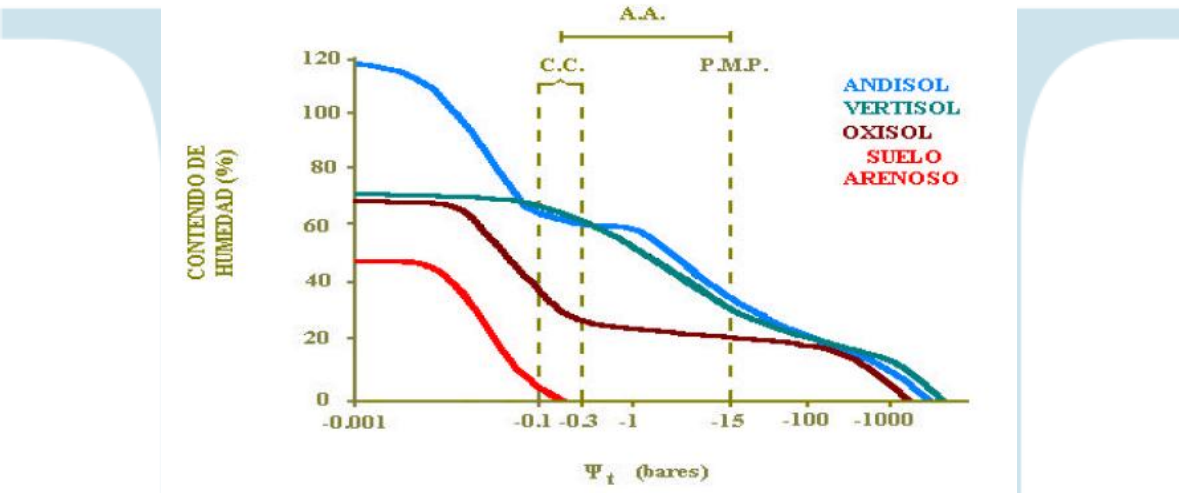

Figura 15. Efecto del tipo de arcilla del suelo, sobre su capacidad de retención de humedad. A.A: Agua aprovechable, C.C: Capacidad de campo y P.M.P: Punto de marchitéz permanente. Fuente: Jaramillo (2002).

Se puede observar una buena retención de humedad en los andisoles, gracias a la presencia de la arcilla alófana, seguida de los vertisoles con presencia de arcillas expansibles. En oxisoles existe una baja retención de humedad debido a la presencia de texturas gruesas y macro poros, que no pueden retener el agua.

- **Infiltración y permeabilidad**

El movimiento del agua y líquidos en el suelo, se realiza mediante los espacios porosos que conforman su estructura. La infiltración, es un parámetro físico que permite cuantificar la cantidad de lámina de agua que esta penetrando por los espacios porosos del suelo, en un tiempo determinado. La medida de la infiltración se realiza mediante cilindros concéntricos que se entierran en el suelo y posteriormente se llenan con agua, de esta forma mediante el uso de una cinta de medición se podrán tomar los tiempos y cantidad de lámina en milímetros o centímetros que se ha infiltrado en el suelo en un determinado periodo. Los suelos de texturas gruesas (Arenosos o Franco arenosos), tendrán tasas de infiltración más altas que los suelos de texturas más finas (Arcillosos o Franco

Arcillosos), ya que la presencia de poros de mayor tamaño permiten un mayor caudal de entrada del agua en el suelo. Cuando un suelo tiene menor contenido de humedad, mayor es su tasa de infiltración en el perfil ya que existen mayor cantidad de espacios porosos libres.

La permeabilidad del suelo es una medida inversa a la infiltración, y es cuantificada mediante el parámetro de la Conductividad hidráulica. La conductividad hidráulica permite medir la posibilidad del agua de moverse dentro del suelo. De esta forma, se encontrarán mayores valores de conductividad hidráulica cuando el suelo está saturado (todos los espacios porosos llenos de agua) y muy baja cuando los espacios porosos están libres. La conductividad hidráulica se puede cuantificar en el laboratorio, mediante permeametros, exponiendo un suelo saturado a cargas constantes de láminas de agua, observándose los valores de agua que entran y salen de la sección de suelo, en un periodo de tiempo.

- **Consistencia**

La consistencia del suelo, según Jaramillo (2002) es como la propiedad que define la resistencia del suelo a ser deformado por fuerzas externas que se aplican sobre él. Esta propiedad va a depender de los materiales que constituyen la fase sólida del suelo y del contenido de humedad que presente. De acuerdo a lo anterior, el suelo puede presentar distintos estados de consistencia, así:

1. **Estado coherente:** en el estado coherente, el suelo tiene muy bajos contenidos de humedad. Se caracteriza en suelos de textura gruesa por la desagregación de las partículas y en suelos de texturas finas por la formación de terrones duros. En este estado es difícil el laboreo ya que hay gran resistencia del suelo para ser penetrado.

2. **Estado Friable:** En el estado friable (frágil), el suelo presenta estados de humedad mayores que en el estado coherente, por lo que es más manejable, incluso en texturas finas los agregados pueden destruirse fácilmente sin ejercer mucha fuerza. Es el estado óptimo para la labranza del suelo.

3. **Estado plástico:** En el estado plástico, el suelo alberga humedad considerable, de tal forma que en suelos arcillosos se parece a una plastilina que se deja moldear fácilmente y que se deforma con su propio peso. En este estado no es aconsejable la labranza ya que se puede compactar el suelo.

4. **Estado de Fluidez:** En el estado de fluidez el suelo esta saturado de agua, y empieza a presentar características de fluido. En suelos cultivados bajo inundación como el caso del cultivo de arroz, es típico éste estado.

- **Profundidad efectiva del suelo**

La profundidad efectiva, define la profundidad del suelo hasta donde se pueden desarrollar las raíces de las plantas. Esta propiedad depende en gran medida de los materiales que constituyen el suelo y de los procesos formativos. Los suelos de los valles (molisoles y vertisoles) que han sido formados

por materiales de arrastre de los ríos y lagunas (aluviales) presentan profundidades efectivas altas. Los suelos derivados de cenizas volcánicas gracias a la presencia de materiales arenosos en superficie, presentan profundidades efectivas muy altas, por ello su riqueza de poblaciones arbóreas con raíces profundas. Los suelos jóvenes (inceptisoles y ultisoles), presentan poca profundidad efectiva para las raíces de las plantas y a pocos centímetros se pueden encontrar fragmentos de roca madre que genera resistencia mecánica.

Los análisis de suelo, que se realizan para determinar sus características y niveles de fertilidad, generalmente son tomados dentro de los primeros 30 cm, ya que allí se desarrolla el mayor porcentaje de raíces de las plantas y se concentran la mayoría de los elementos nutritivos.

Conceptos clave:

El movimiento del agua en el suelo y su capacidad de retención de humedad, son fundamentales para el desarrollo de los organismos y las plantas. Los suelos de texturas gruesas y bajos contenidos de materia orgánica retienen poca humedad, contrario a los suelos de texturas finas y buenos contenidos de materia orgánica, que son óptimos para la agricultura.

Recursos:

Lectura sugerida:

Ruiz E., Venialgo F., Crispín A., Gutiérrez N., Ingaramo O., Briend M. (2004). Infiltración de agua en el suelo con diferentes usos en el Departamento 9 de Julio (Chaco). Publicado por la Universidad Nacional del Nordeste de Argentina. 4p.

Disponible en:
http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/com2004/5-Agrarias/A-070.pdf

Presentación:

Agua en el suelo. Material virtual del curso de edafología de la Universidad de la República de Uruguay.

Disponible en:
http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Agua%20en%20el%20suelo.pdf

Lección 9. Las propiedades químicas del suelo (Intercambio iónico, acidez – alcalinidad).

Según Fassbender (1982), la química de suelos es aquella parte de la ciencia del suelo que estudia la composición, las propiedades y reacciones químicas de los suelos. Los mayores esfuerzos encaminados hacia la comprensión de las propiedades químicas del suelo, han sido enfocados hacia la nutrición vegetal. El estudio de los coloides del suelo, el intercambio iónico, la reacción del suelo

(pH), la conductividad eléctrica y el tipo de compuestos químicos presentes, son los temas más sobresalientes.

Los coloides del suelo

El estudio de los coloides del suelo se considera de vital importancia a la hora de evaluar sus propiedades químicas. Según Jaramillo (2002) una partícula coloidal es aquella que posee un tamaño menor de 0.001 mm de diámetro (1µm), dimensiones responsables de la alta superficie específica que las caracteriza; poseen además, carga eléctrica que les confiere una alta reactividad química. Se denomina superficie específica de un cuerpo, al área total que expone, es decir, es el área externa que posee ese cuerpo por unidad de peso del mismo. Así, la superficie de un cubo de 1g de peso, será la suma de las áreas de seis caras que posee ese cubo: $6L^2$ (en unidades de $cm^2.g^{-1}$), donde L es el lado del cubo.

Dentro de la composición del suelo, la fracción coloidal esta representada por las arcillas y la materia orgánica humificada. De esta forma estos componentes actúan de manera dinámica en la actividad química que se desarrolla en el suelo. Los coloides del suelo pueden presentar cargas de tipo permanente o variable. Así por ejemplo, las arcillas silicatadas (formadas por silicatos laminares) de tipo 2:1 (dos láminas de tetraedros por una capa de octaedros) aportan cargas negativas en su superficie específica, al igual que el humus. El otro tipo de arcillas, las 1:1 (una capa de tetraedros por otra de octaedros) así como los óxidos de hierro y aluminio, aportan cargas variables (negativas o positivas) según el pH del medio.

- **Intercambio iónico del suelo**

La presencia de cargas negativas en la superficie coloidal del suelo, será la responsable de su intercambio iónico con los cationes (elementos de carga positiva) presentes en la solución del suelo, denominada capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.). El número de cargas presentes, indica la posibilidad de enlace con igual número de elementos catiónicos. Así, un suelo con altos contenidos de arcillas del tipo 2:1 y humus, tendrá mayor posibilidad de intercambiar cationes con la solución del suelo, haciéndolo más fértil. Los cationes mas importantes dentro de la solución del suelo son el Ca, Mg, K, Na y Al, así como compuestos como el NH_4 y NO_3, quienes son responsables de la nutrición vegetal.

La capacidad de intercambio iónico del suelo con elementos o compuestos de carga negativa, se denomina capacidad de intercambio aniónico (C.I.A.). El humus del suelo, tiene la posibilidad además de presentar en superficie cargas positivas, generando enlaces con aniones presentes en la solución del suelo. Las arcillas de tipo 1:1 (Caolinitas) y los óxidos de Fe y Al, incrementan su intercambio aniónico a mediada que se incrementa el pH. Los fosfatos y sulfatos, responsables de la nutrición vegetal, se encuentran en la solución del suelo de forma aniónica, por ello la importancia de que el suelo presente las dos formas de intercambio iónico.

La adsorción iónica es la capacidad de los coloides del suelo de realizar enlaces temporales con los iones presentes en la solución del suelo. De esta forma, los iones (cationes y aniones) pueden adsorberse o desorberse (retornar a la solución del suelo) en un proceso dinámico y reversible. Esta

propiedad del suelo, esta afectada por la carga que tengan los iones y por la concentración en que se encuentren dentro de la solución del suelo. Así, los elementos Ca^{+2} y Mg^{+2} pueden tener mayor posibilidad de estar adsorbidos que los elementos K^{+1} y Na^{+1}, ya que tienen mayor carga. Al igual que si por ejemplo tenemos mayor concentración de alguno de estos elementos en solución, el elemento desplazará de la región de intercambio a los otros generando una especie de monopolio. Este caso se presenta frecuentemente con el Na en suelos alcalinos y con el Al en suelos muy ácidos. Existen modelos para ilustrar el proceso de adsorción y desorción de iones en el suelo, denominados modelos de la doble capa difusa. La figura 16, ilustra algunos modelos de doble capa difusa.

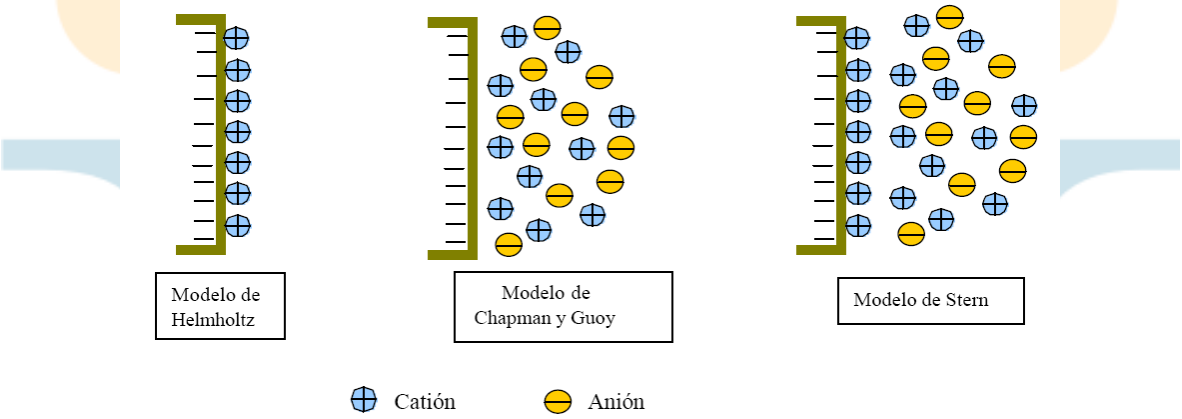

Figura 16. Diferentes modelos de doble capa difusa. Se ilustra como las cargas negativas que presenta el suelo albergan cationes y repelen aniones. Fuente: Jaramillo (2002).

La adsorción iónica es un proceso muy importante dentro de la contaminación del suelo, ya que algunos agentes contaminantes son elementos catiónicos como por ejemplo los metales pesados, al igual que otros de carácter molecular como los pesticidas, que pueden ser quelatados o acomplejados por el suelo gracias a su contenido coloidal, sobre todo de humus, como se verá mas adelante. El cuadro 10, ilustra algunos valores de la capacidad de intercambio catiónico que pueden tener algunos coloides del suelo. Nótese la alta capacidad del humus para intercambiar cationes con el suelo (200 $cmol.kg^{-1}$) comparado con los otros minerales.

Cuadro 10. Valores de CIC promedios de algunos coloides presentes en el suelo. Fuente: Jaramillo (2002).

Tipo de Coloide	CIC en [cmol (+) kg^{-1}]
Vermiculita	125
Montmorillonita	100
ilita	30
Clorita	30
Caolinita	9
Sesquióxidos de Fe y Al	6.5
Alófano	80
Humus	200

- **La reacción del suelo**

Se denomina reacción del suelo a la propiedad química que estudia los estados de acidez, neutralidad o basicidad del suelo mediante la evaluación del pH. La acidez del suelo hace referencia a valores bajos de pH, que puede llegar a ser 3.5, donde existen en solución iones H^+ libres que aumentan el potencial de hidrogeniones. Un suelo neutro presenta valores de pH entre 6.6 y 7.3 considerándose óptimos para la agricultura, ya que a esos valores se encuentran disponibles gran cantidad de nutrientes. La basicidad del suelo, se debe a la concentración de OH^- (iones hidróxido) en la solución del suelo, pudiendo presentar un pH mayor a 7.4 y llegar a ser extremo como los suelos alcalinos (con altas concentraciones de carbonatos y bicarbonatos) donde el pH puede estar cercano a 9.0. El pH del suelo, es una variable que depende de muchos factores como el tipo de material parental, el régimen de lluvias, la presencia de sales en solución, la presencia de CO_2, de ácidos orgánicos y del manejo que se haga del mismo.

Sin embargo, el material parental es una de las variables más representativas. Un suelo que se deriva de rocas cuarziticas o graníticas tiende a presentar pH ácido por la liberación de H^+ en los minerales componentes. De otro lado, un suelo que se deriva de rocas calizas puede incrementar el pH del suelo, debido a la liberación de OH^- a la solución por la reacción de los carbonatos con el agua. Las zonas lluviosas donde hay buen drenaje, tienden a presentar pH ácido como es el caso de los oxisoles, andisoles e inceptisoles. El uso de fertilizantes nitrogenados de síntesis como la Urea (nitrato de amonio), pueden liberar hidrogeniones a la solución del suelo gracias a su reacción con el agua, lo que disminuye el pH. La materia orgánica en estado de descomposición libera moléculas de CO_2 que en contacto con el agua forma ácido carbónico, incrementando la acidez.

La presencia de sales en solución en zonas calidas de baja precitación y alta evapotranspiración, incrementan el pH del suelo. El pH del suelo puede modificarse parcialmente a través de condiciones de manejo como la aplicación de cales en suelos ácidos y sales sulfatadas como el yeso en suelos básicos. Sin embargo, el uso de enmiendas orgánicas en el suelo como el compostaje, lombricompostaje, mulch, abonos verdes y otros; pueden mejorar las condiciones de pH gracias a que mejoran su poder Buffer. La evaluación del pH del suelo se realiza con un potenciómetro, en relación 1:1 con agua destilada (unidad másica de agua por unidad másica de suelo seco) en suelos minerales, y 2:1 (dos unidades másicas de agua por unidad másica de suelos seco) en suelos con altos contenidos de materia orgánica.

El cuadro 11, muestra la clasificación de los suelos según su valor de pH. En suelos con valores de pH muy fuertemente ácido a ultra ácido, las concentraciones del ión Al^{+2} pueden llegar a ser muy altas, generando toxicidad por este elemento en las plantas. En suelos con pH fuertemente alcalino, las concentraciones del ión Na^{+1} pueden generar problemas estructurales del suelo por su poder dispersante, así como toxicidad en las plantas al incrementar la presión osmótica.

Cuadro 11. Clasificación de los suelos según el valor del pH. Fuente: Soil Survey división Staff (SSDS, 1993).

Valor	Clasificación
< 3.5	Ultra ácido
3.5 - 4.4	Extremadamente ácido
4.5 - 5.0	Muy fuertemente ácido
5.1 - 5.5	Fuertemente ácido
5.6 - 6.0	Moderadamente ácido
6.1 - 6.5	Ligeramente ácido
6.6 - 7.3	Neutro
7.4 - 7.8	Ligeramente alcalino
7.9 - 8.4	Moderadamente alcalino
8.5 - 9.0	Fuertemente alcalino
> 9.0	Muy fuertemente alcalino

Conceptos clave:

Las propiedades químicas del suelo, se deben en gran medida a los coloides que lo conforman. Las arcillas y la materia orgánica humificada representan la fracción coloidal del suelo, la cuál afecta el intercambio de nutrientes y la fertilidad del mismo.

Recursos:

Lectura sugerida:

Heredia O. y Fernández A. (2008). Importancia de las propiedades de los suelos en la determinación del riesgo de contaminación de acuíferos. Publicado en revista CI. Suelo (Argentina). Vol. 26 No. 2: 131- 140.

Disponible en:
http://www.scielo.org.ar/pdf/cds/v26n2/v26n2a03.pdf

Presentación:
La reacción del suelo. Material virtual del curso de edafología de la Universidad de la República de Uruguay.

Disponible en:
http://edafologia.fcien.edu.uy/archivos/Reaccion%20del%20suelo.pdf

Lección 10. Contenido de materia orgánica y fertilidad

De la fracción coloidal del suelo, la materia orgánica sobresale por su amplia función y aporte a las demás propiedades. La materia orgánica del suelo (MOS), representa un sistema complejo, heterogéneo y dinámico integrado por numerosos componentes. Labrador (1996) define a la MOS como la totalidad de sustancias orgánicas presentes en el suelo que proceden de: restos de plantas y animales, en diferentes estados de transformación, exudados radicales, aportes orgánicos externos - estiércol, compost, productos xenobióticos, así como los organismos edáficos – biomasa del suelo y los productos resultantes de su senescencia y metabolismo.

La importancia de la materia orgánica del suelo, radica en su aporte como agente químico, físico y biológico. Se puede hacer una clasificación de los componentes de la materia orgánica del suelo, de acuerdo a sus características y al estado en que se encuentren presentes. La figura 17, ilustra a nivel general los componentes de la materia orgánica del suelo.

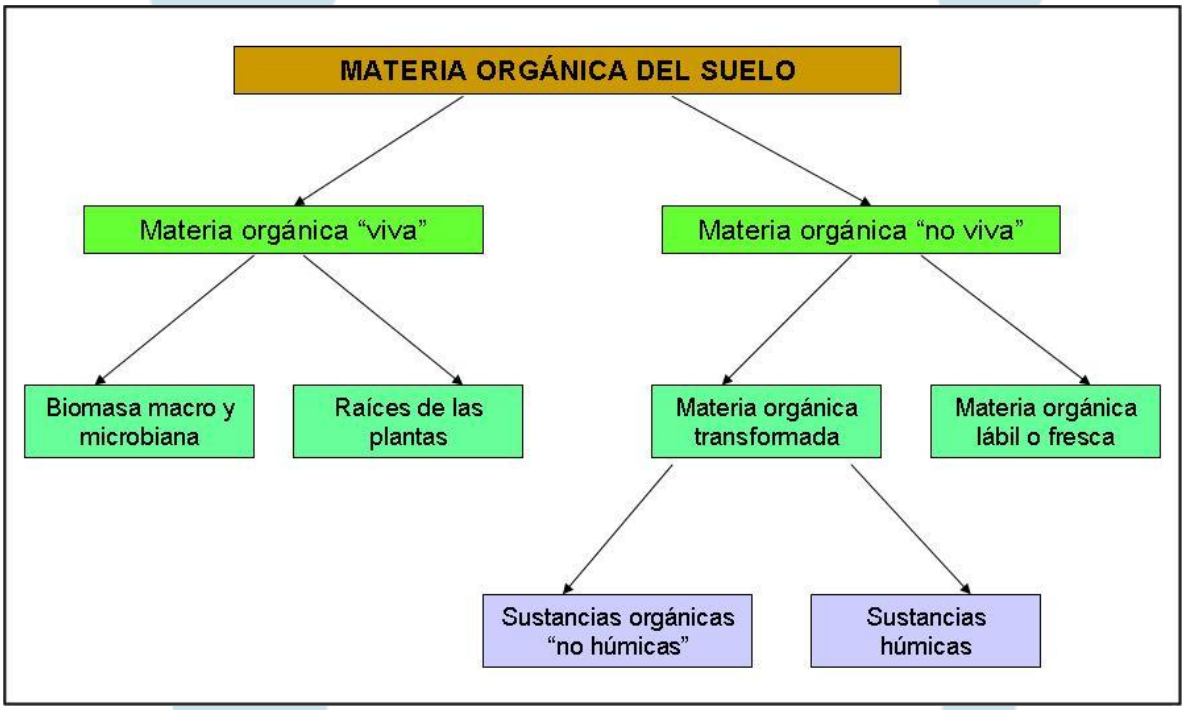

Figura 17. Componentes de la materia orgánica. Fuente: Labrador (1996).

La materia orgánica viva, está constituida por los organismos del suelo (macro y microorganismos) y las raíces de las plantas. Los organismos del suelo cumplen la función de degradadores de los compuestos orgánicos frescos así como de sintetizadores de compuestos inorgánicos. La materia orgánica no viva está constituida por materia orgánica lábil y materia orgánica estabilizada. La materia orgánica lábil es aquella conformada por residuos de hojarasca, tallos y restos de animales que empiezan su proceso de descomposición. La materia orgánica estabilizada está formada por el

humus del suelo, que a su vez está constituido por sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) y humina.

De los componentes de la materia orgánica del suelo el humus es considerado de vital importancia, ya que es la fracción más estable y cumple papel importante sobre todas las demás propiedades del suelo, permitiendo un mejoramiento de su fertilidad. Los ácidos húmicos son compuestos de carbono muy estables, que tienen colores oscuros y pueden afectar el intercambio iónico por la alta capacidad de cargas en superficie, permitiendo acomplejar elementos presentes en el suelo como los metales pesados y otros residuos contaminantes. Los ácidos fúlvicos son compuestos menos densos que los húmicos, presentan colores pardos claros y tienen gran capacidad de quelatación de elementos en el suelo, considerándose vehículos de nutrientes para su absorción por las raíces de las plantas. La humina, es un compuesto de carbono muy estabilizado, prácticamente inerte, que afecta las propiedades físicas del suelo, debido a la formación de complejos estructurales con las arcillas, mejorando la agregación.

La figura 18, ilustra algunas características de las sustancias que componen el humus del suelo. Nótese el incremento en el grado de polimerización (estabilidad química por compuestos de carbono) de izquierda a derecha.

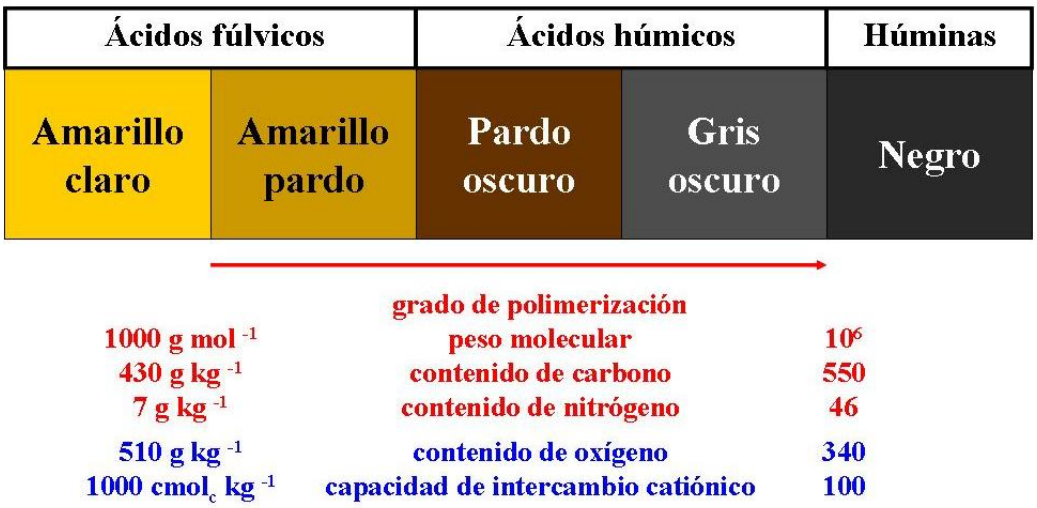

Figura 18. Componentes del humus del suelo. Fuente: Stevenson (1982)

Importancia de la materia orgánica del suelo

La importancia de la materia orgánica del suelo, radica principalmente en las propiedades del humus estable, así:

1. Color oscuro, que facilita la absorción de mayor cantidad de radiación solar mejorando la transferencia térmica.

2. Alta retención de humedad (hasta 20 veces su peso), evitando la desecación del suelo, incrementando las poblaciones de organismos y solubilizando los nutrientes.
3. Formación de complejos con partículas de arcilla, lo que mejora la estabilidad estructural y evita perdidas.
4. Formación de quelatos con elementos metálicos presentes en el suelo, mejorando la disponibilidad para las plantas y reduce riesgos por contaminación de metales pesados.
5. Poder buffer (regulador de pH), permitiendo la estabilidad del suelo cuando se adicionan compuestos muy ácidos o alcalinos.
6. Alta capacidad de intercambio catiónico, lo que incrementa la fertilidad de los cultivos.
7. La alta mineralización, permite la liberación de elementos nutritivos al suelo, sin embargo puede convertirse en perdida si no hay adiciones permanentes de residuos frescos.

Sin embargo, los contenidos de materia orgánica del suelo pueden variar dependiendo de la zona agroecológica donde se encuentren. El cuadro 12, ilustra una descripción del contenido de materia orgánica del suelo, de acuerdo al clima. Los porcentajes de materia orgánica se pueden incrementar a medida de que disminuye la temperatura, debido a una menor tasa de descomposición y mineralización de los residuos frescos.

Cuadro 12. Caracterización del suelo de acuerdo a sus contenidos de materia orgánica en (bajo, medio o alto). Fuente: Labrador (1996)

Clima	Porcentajes (%) de materia orgánica en el suelo		
	Bajo	Medio	Alto
Frío	menor de 5	5 -10	más de 10
Templado	menor de 3	3 - 5	más de 5
Cálido	menor de 2	2 - 3	más de 3

Conceptos clave:

La materia orgánica del suelo (MOS) es un componente sumamente importante, ya que afecta de forma positiva la mayoría de sus propiedades. En zonas altas y de bajas temperaturas la MOS tiende a acumularse, contrario a las zonas bajas donde las altas temperaturas incrementan los procesos de mineralización.

Recursos:

Lecturas sugeridas:

1. Sánchez B., Ruiz M., Rios M. (2005). Materia orgánica y actividad biológica del suelo en relación con la altitud, en la cuenca del río Maracay, estado Aragua Venezuela. Artículo publicado en la revista Agronomía tropical No. 55(4): 507- 534.

Disponible en:
http://www.scielo.org.ve/pdf/at/v55n4/art04.pdf

2. Martínez E., Fuentes J.P., Acevedo E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. Artículo publicado en la revista Chilena Suelo y nutrición vegetal, No 8(1): 68-96.

Disponible en:
http://www.scielo.cl/pdf/rcsuelo/v8n1/art06.pdf

Multimedia:

Video:

La vida en el suelo. Documental ganador del premio que otorga el Ministerio de Ciencia y Tecnología de Japón, en el festival de video en Ciencia y Tecnología de Japón.

Parte 1:
http://www.youtube.com/watch?v=CpYWD7AQEjc

Parte 2:
http://www.youtube.com/watch?v=PRQWbcnraNw&feature=related

Resumen:

En el video se hace énfasis en la importancia de la materia orgánica para la manutención de la vida en el suelo. Se ilustran los distintos tipos de organismos que habitan el suelo y la función que cumplen dentro del micro ecosistema y la agricultura.

CAPITULO 3. TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

Los procesos de retención y transporte de sustancias tóxicas en el suelo, dependen en gran medida de las propiedades coloidales de sus componentes, así como de la reactividad y solubilidad de los contaminantes. La comprensión de los diferentes procesos de adsorción y degradación natural de contaminantes en el suelo se constituye en punto de partida dentro del diseño de estrategias para la remediación. Escenarios de afectación por contaminantes de alta solubilidad en suelos de texturas gruesas y bajos contenidos de materia orgánica, indican alertas, por la posibilidad de que los contaminantes alcancen los mantos acuíferos subterráneos, incrementando la magnitud del problema. El potencial genético que albergan los microorganismos posibilita la biodegradación de una amplia gama de sustancias que llegan al suelo mediante su actividad enzimática, por ello la importancia de mantener las poblaciones microbianas a través de la adición permanente de materia orgánica fresca. El presente capítulo, busca afianzar el conocimiento sobre los distintos procesos que afectan el transporte de los contaminantes en el suelo con miras a identificar las posibles alternativas de solución.

Lección 11. Principios de flujo y transporte de contaminantes en el suelo.

El suelo como recurso natural, se encuentra expuesto a la descarga de sustancias provenientes del medio natural y actividades humanas. Sin embargo, el tipo de sustancia y el nivel de concentración en que se encuentre pueden generar impactos en el suelo por contaminación. Sabroso y Pastor (2004) definen el suelo contaminado como todo aquel cuyas características físicas, químicas o biológicas han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes de carácter peligroso, en concentración tal que comporte un riesgo para la salud humana o el medio ambiente.

Los contaminantes del suelo se presentan en forma sólida, gaseosa o líquida, siendo esta última la más frecuente. Una vez el contaminante entre en contacto con el suelo puede ser degradado por los organismos presentes, adsorbido por los coloides o transportarse por los espacios porosos del suelo hasta los mantos acuíferos, afectando el recurso hídrico. En este sentido la permeabilidad del suelo, medida a partir de su conductividad hidráulica, determinará en gran medida el flujo y transporte de la sustancia dentro del perfil del suelo.

Como mencionamos anteriormente, la conductividad hidráulica del suelo es mayor cuando el suelo esta en condiciones de saturación (todos los poros están llenos de agua) y va decreciendo cuando llega al contenido de humedad de marchitéz permanente (retención a 15 bares de presión por las partículas del suelo). En suelos con mayor cantidad de macro poros, como aquellos de texturas gruesas (Arenosos o Franco Arenosos) se incrementa la conductividad hidráulica del agua y los solutos, permitiendo menor tiempo de permanencia de los contaminantes pero incrementado el riesgo de pasar a las aguas subterráneas y niveles freáticos donde se acumulan. Por el contrario, en suelos de texturas finas (Arcillosos y Franco Arcillosos) así como de altos contenidos de materia orgánica, los contaminantes pueden quedar retenidos debido a la tensión ejercida por la superficie específica de éstos coloides. Si bien es una ventaja que los contaminantes no pasen a los mantos

acuíferos del suelo, se generan otros impactos en los horizontes superiores ya que allí se desarrollan las raíces de las plantas y la biota del suelo, pudiendo causar problemas de toxicidad y bioacumulación de contaminantes.

La figura 19, ilustra esquemáticamente la estructura de un permeámetro (instrumento para estimar la conductividad hidráulica del suelo). El contaminante que se encuentra en solución con el agua, puede percolarse por los poros del suelo y ser transportado en forma vertical u horizontal, de manera que salga o quede retenido y se concentre en los horizontes superiores (sobre todo en la fase coloidal).

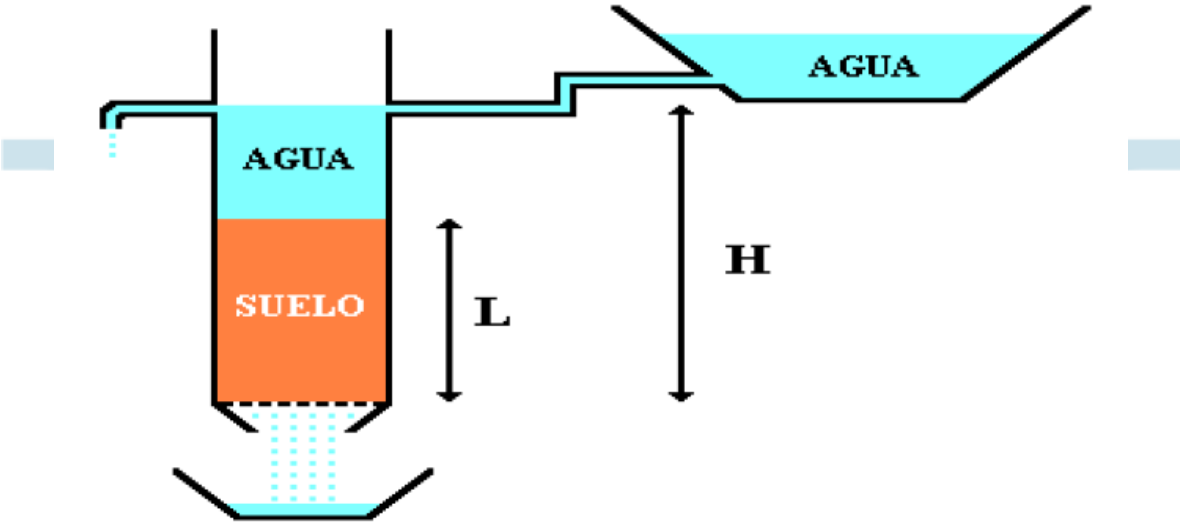

Figura 19. Representación esquemática de un permeámetro con cabeza constante de agua. El esquema puede ser extrapolado para contaminantes líquidos que se percolan en el suelo. Fuente: Jaramillo (2002).

Para estimar la conductividad hidráulica de los solutos contaminantes del suelo, se pueden establecer balances de masa teniendo en cuenta el flujo que se percola por unidad de tiempo. De esta manera se estima la cantidad de contaminante que está siendo retenido en el suelo y aquel que potencialmente llega a los mantos acuíferos. En el laboratorio, se pueden hacer simulaciones del flujo de contaminantes mediante prueba de trazadores, usando permeámetros cilíndricos.

La conductividad hidráulica saturada (K) en el permeámetro, se estima mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{V}{tA} \; x \; \frac{L}{H}$$

K: Conductividad hidráulica saturada en $cm.h^{-1}$ (centímetros por hora)
V: Volumen total de agua y soluto contaminante que pasó por el cilindro en cm^3
t: Tiempo empleado en la prueba en horas

A: Área transversal del cilindro en cm^2
L: Longitud de la columna de suelo en cm
H: Longitud de la columna de agua en cm

El cuadro 13, muestra la clasificación de algunos valores de conductividad hidráulica en suelos saturados. Estos valores permiten conocer como es la tasa de difusión de los contaminantes líquidos en el suelo, y las posibilidades de permanencia o salida del sistema.

Cuadro 13. Clasificación de la conductividad hidráulica del suelo en ($cm.h^{-1}$). Fuente: Soil Survey División Staff (1993).

Clase	Conductividad hidráulica ($cm.h^{-1}$)
Muy alta	> 36
Alta	3.6 - 36
Moderadamente alta	0.36 - 3.6
Moderadamente baja	0.036 - 0.36
Baja	0.0036 - 0.036
Muy baja	< 0.0036

Los suelos que presentan conductividad hidráulica de moderadamente alta a muy alta, son suelos minerales ya que predominan partículas de arena y limos, por lo tanto no son reactivos. De otro lado, los suelos que presentan conductividad hidráulica muy baja a moderadamente baja, están conformados en su mayoría por minerales de arcilla y materia orgánica, favoreciendo la retención de los solutos contaminantes. En este último tipo de suelos, es común encontrar encharcamientos en superficie ya que se impermeabilizan parcialmente por acción del taponamiento de los microporos.

Conceptos clave:

Un suelo contaminado, es aquel cuyas características físicas, químicas o biológicas han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes de carácter peligroso, en concentración tal que comporte un riesgo para la salud humana o el medio ambiente (Sabroso y Pastor, 2004). El flujo de contaminantes en el suelo será mayor en suelos de textura gruesa, pudiendo transportar los contaminantes hacia los mantos acuíferos.

Recursos:

Multimedia

Video:

La contaminación del suelo. Dirección empresarial y calidad ambiental. Producido por Europa-Audiovisual.com.

Disponible en:
http://www.youtube.com/watch?v=K6laW3V8m4A

Resumen:

Se describen los aspectos conceptúales más importantes acerca de la contaminación del suelo y su impacto sobre el recurso hídrico y la agricultura. Se clasifican los contaminantes y se hace mención de los procesos de atenuación natural que tiene el suelo para poder degradar y adsorber los contaminantes.

Lección 12. Procesos de flujo y transporte de contaminantes.

El flujo y transporte de contaminantes en el suelo es un proceso complejo, ya que intervienen distintos fenómenos físicos, químicos y biológicos. Orrego y Arumi (2005), sugieren los principales procesos de flujo y transporte de contaminantes en el suelo de la siguiente forma:

1. **Difusión molecular:** Los contaminantes al ser solutos, pueden difundir mediante la ley de Fick, de zonas de mayor a menor concentración.

2. **Dispersión:** Los contaminantes al mezclarse con el suelo, tienden a disolverse con sus componentes. La dispersión puede ser mecánica o hidrodinámica. La dispersión mecánica se presenta cuando el flujo de contaminante encuentra barreras físicas u obstrucciones con los materiales gruesos, tomando distintas rutas en el suelo. La dispersión hidrodinámica se presenta cuando el contaminante es solubilizado por el agua del suelo y empieza a comportarse mediante propiedades de flujo continuo, dentro de los primeros horizontes. La figura 20, ilustra los procesos de difusión molecular y dispersión de contaminantes en el suelo.

3. **Advección:** Se presenta cuando el contaminante adquiere movimiento por acción del medio líquido de transporte (agua). Este proceso es muy importante sobre todo cuando el contaminante se encuentra en el subsuelo cercano a los mantos freáticos o aguas subterráneas. La figura 21, ilustra la percolación de los contaminantes hasta las aguas subterráneas.

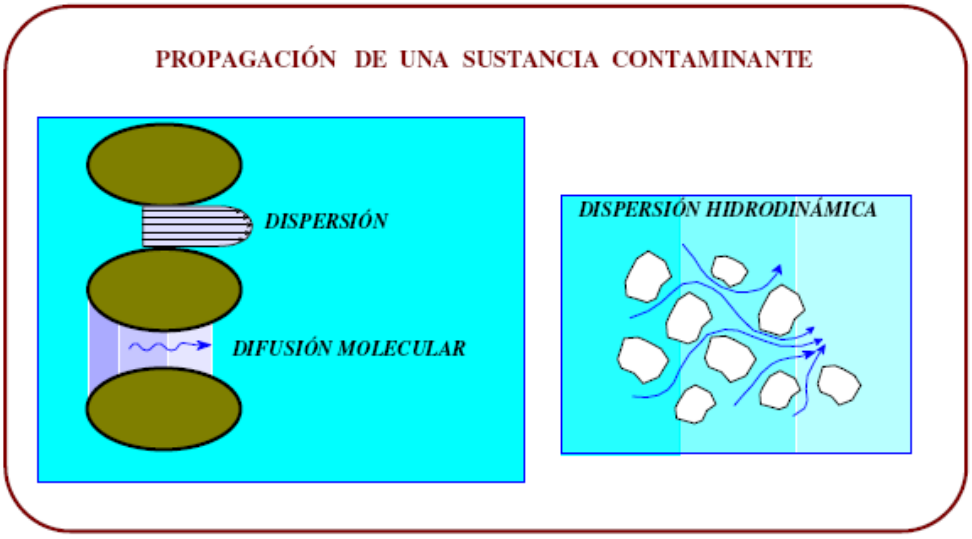

Figura 20. Propagación de una sustancia contaminante en el suelo.

Fuente: http://www.agua.uji.es/pdf/leccionRH20.pdf

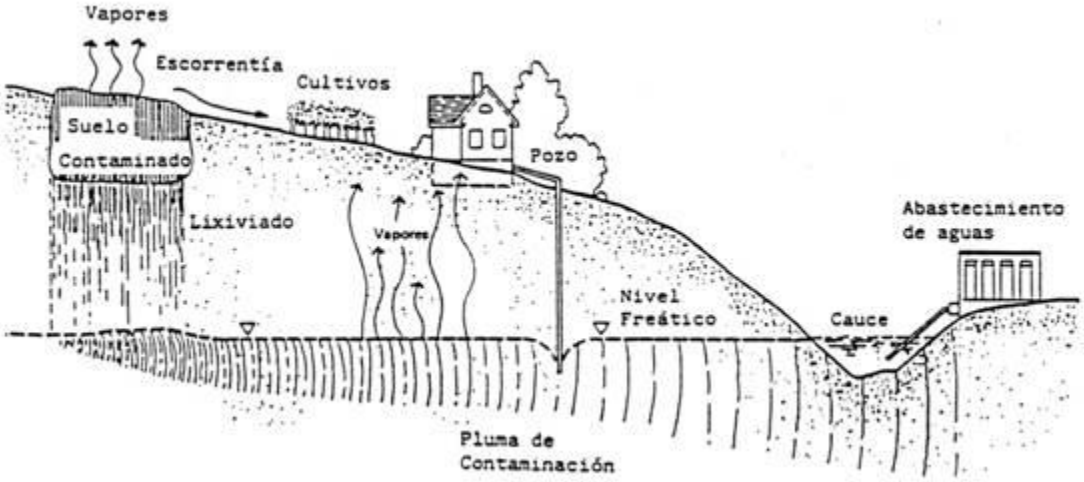

Figura 21. Afectación de contaminantes al subsuelo y aguas subsuperficiales.

Fuente: http://www.gestion-calidad.com/suelos-contaminados.html

Existen otros procesos que afectan el transporte de contaminantes en el suelo y que pueden reducir su concentración. El suelo al estar compuesto por minerales y materiales orgánicos (materia orgánica viva y no viva), se convierte en un reactor bioquímico donde se dan diversas

transformaciones, entre ellas la degradación de contaminantes. Sin embargo nombraremos aquí los procesos más importantes: El retardo y la atenuación.

Retardo: Es un proceso que limita el transporte de los contaminantes en el suelo, debido a su remoción o inmovilización por acción de los coloides y/o la biomasa microbiana. Desde el punto de vista químico el retardo puede presentarse por sorción y precipitación (juega un papel fundamental las cargas y enlaces iónicos). En el retardo, los contaminantes no son transformados y el proceso es reversible. Este caso se presenta en los metales pesados y algunos plaguicidas recalcitrantes.

Atenuación: Hace referencia principalmente a dos procesos: remoción irreversible y transformación. La remoción irreversible tiene lugar cuando la concentración de la sustancia se reduce, actuando como mecanismo de atenuación de contaminantes. La transformación se presenta cuando en el suelo se producen reacciones de oxidación o reducción, lo que modifica la estructura química del contaminante. En este último proceso es muy importante la aireación del suelo ya que los organismos responsables de la atenuación son en su mayoría aerobios y muchos de los productos son liberados a la atmósfera por volatilización.

Conceptos clave:

El flujo y transporte de contaminantes en el suelo es un proceso complejo, ya que intervienen distintos fenómenos físicos, químicos y biológicos. Los principales procesos de flujo y transporte de contaminantes son: La difusión molecular, la dispersión y la advección. Otros procesos como el retardo y la atenuación, reducen el flujo y transporte de contaminantes en el suelo.

Recursos:

Multimedia:

Página web:

Contaminación del suelo. Universidad de Granada – España.

Disponible en:
http://edafologia.ugr.es/conta/tema00/progr.htm

Lección 13. Procesos en la interfase sólido – líquido

Los procesos que se generan en el suelo en su interfase líquida (solución) y sólida (sobre todo la coloidal) con compuestos contaminantes, son muy importantes a la hora de evaluar el tiempo de permanencia del residuo en el suelo y las posibles técnicas para su remediación. La solubilidad,

movilidad y adsorción son los procesos más importantes. La solubilidad, según Volke y Velasco (2002) es la cantidad de compuesto que puede disolverse en agua, es decir, define la disponibilidad potencial de los compuestos en la fase líquida, siendo influenciada por el tamaño de la molécula y su polaridad.

Entre mayor sea la solubilidad del contaminante en el agua, mayor será su movilidad por los poros del suelo. Sin embargo, la movilidad del contaminante está también afectada por la capacidad de adsorción del contaminante por la fase coloidal del suelo, siendo mucho mayor en el humus que en las arcillas. El coeficiente de partición permite establecer la relación entre la cantidad de contaminante que se encuentra retenido en los coloides del suelo y aquella que está soluble. La FAO (2000) define para plaguicidas el coeficiente de partición suelo – agua (K_{oc}), como la razón entre la concentración de plaguicida en estado de adsorción (es decir adherido a las partículas de suelo) y la fase de solución (es decir, disuelto en el agua del suelo). De esta forma, cuanto menor sea el valor de K_{oc} mayor será la concentración del plaguicida en la fase líquida, teniendo mayor movilidad y causando grave riesgo de contaminación de aguas subterráneas.

El cuadro 14, ilustra de manera cualitativa el nivel de movilidad de plaguicidas en el suelo, para distintos coeficiente de partición. Debido a valores tan amplios del coeficiente K_{oc} se recomienda usar el logaritmo de K_{oc} (Log K_{oc}).

Cuadro 14. Clasificación de la movilidad de contaminantes plaguicidas en el suelo. Fuente: FAO (2000).

Log K_{oc}	Clasificación
< 1	Sumamente móvil
1 - 2	Móvil
2 -3	Moderadamente móvil
3 - 4	Ligeramente móvil
4 - 5	Escasamente móvil
> 5	No es móvil

Los agroquímicos usados en la agricultura pueden llegar al suelo por acción de las lluvias, quedando adsorbidos o móviles. Algunos insecticidas contaminantes han sido prohibidos para su uso en la agricultura por gobiernos mundiales, como el caso del DDT que por su alta adsorción, puede llegar a permanecer inmóvil en el suelo hasta 50 años. El cuadro 15, muestra algunos compuestos usados en la agricultura, el coeficiente de partición y su movilidad en el suelo.

Cuadro 15. Características de movilidad de algunos agroquímicos en el suelo. Adaptado de FAO (2002).

Compuesto	Fórmula química	Utilización	Log K_{oc}	Clasificación
Aldrin	$C_{12}H_8Cl_6$	Insecticida	3.51	Ligeramente móvil
Atrazina	$C_8H_{14}ClN_5$	Herbicida	0.50	Sumamente móvil
Captafol	$C_{10}H_9C_{14}NO_2S$	Fungicida	3.32	Ligeramente móvil
Carbarilo	$C_{12}H_{11}NO_2$	Insecticida	2.50	Moderadamente móvil
Carbofuran	$C_{12}H_{15}NO_3$	Insecticida	1.30	Móvil
DDT	$C_{14}H_9C_5$	Insecticida	6.20	No es móvil
Hexaclorobenceno	C_6Cl_6	Fungicida	4.5	Escasamente móvil
Malatión	$C_{10}H_{19}O_6PS_2$	Insecticida	3.00	Moderadamente móvil
Moncozeb	$NHCH_2CH_2NHCS.S.MnZn$	Fungicida	3.30	Ligeramente móvil
Paraquat	$C_{12}H_{14}N_2$	Herbicida	1.10	Móvil
Paratión	$C_{10}H_{14}NO_5PS$	Insecticida	3.50	Ligeramente móvil

Los metales pesados son otro tipo de contaminantes del suelo, que son adsorbidos por los coloides o pueden tener alta movilidad llegando ser absorbidos por las raíces de las plantas (algunos causan toxicidad) o movilizarse a las aguas subterráneas. La figura 22, ilustra la tendencia de bioacumulación del cadmio (Cd) por algunos vegetales, en suelos contaminados con el metal.

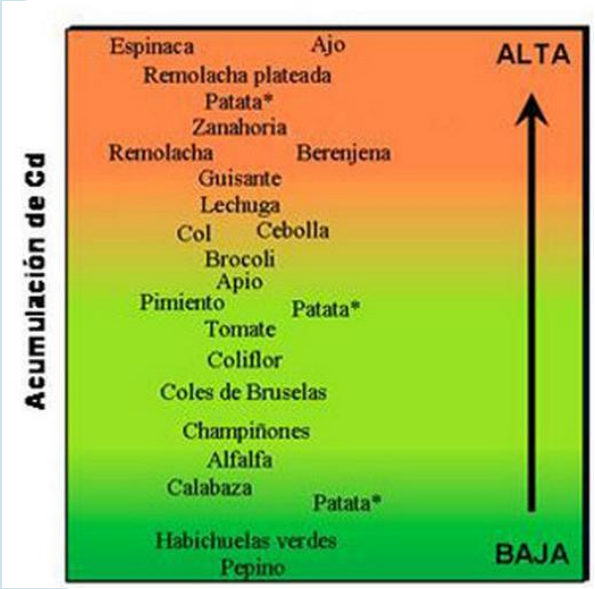

Figura 22. Tendencia de bioacumulación de Cadmio (Cd) por algunos vegetales.

Fuente: http://www.revistaecosistemas.net/revista_frame.asp?pagina=%2Farticulo.asp%3Fid%3D558

La inmovilización de los metales, está regulada por procesos de adsorción y/o precipitación. La movilización está ligada a procesos de complejización con otros compuestos orgánicos e inorgánicos, como lo muestra la figura 23.

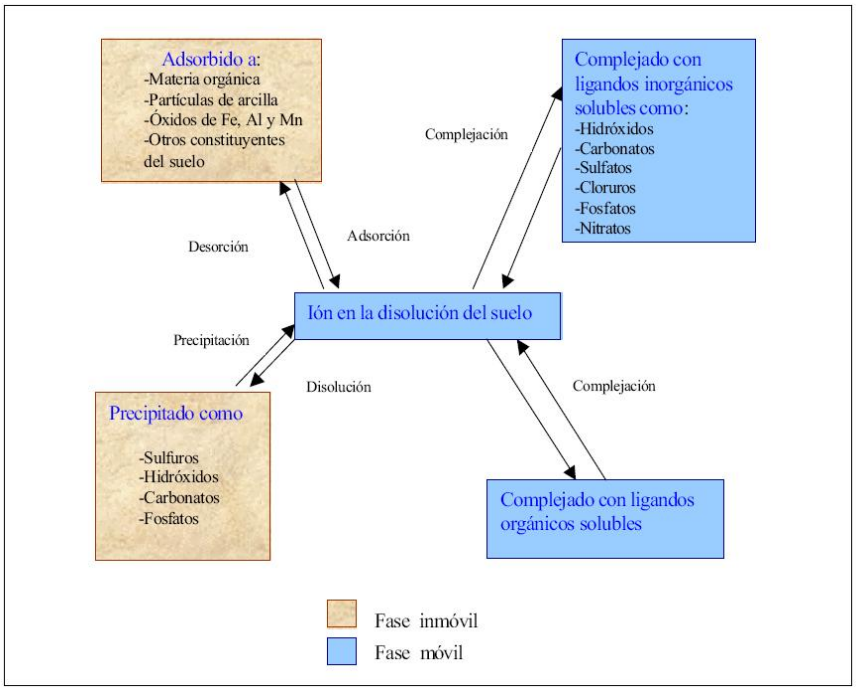

Figura 23. Diagrama de movilidad de los metales pesados en suelo. Fuente: Sánchez (2003).

Conceptos clave:

Los procesos de la interfase sólido – líquido, son muy importantes a la hora de evaluar los mecanismos de transporte de los contaminantes en el suelo. La solubilidad, movilidad y adsorción son los procesos más importantes. Sin embargo, éstos dependerán de las características de la sustancia y de los constituyentes coloidales del suelo.

Recursos:

Libros digitales:

1. Sánchez M.I. (2003). Determinación de metales pesados en suelos de Mediana del Campo (Valladolid): Contenidos extraíbles, niveles fondo y de referencia. Tesis doctoral de la Universidad de Valladolid España. 298p.

Disponible en:
http://bvc.s3.dev.cervantesvirtual.com/pdf_parser/0010148e-82b2-11df-acc7-002185ce6064.pdf

2. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO. (2000). Evaluación de la contaminación del suelo, capitulo 8 Eliminación de plaguicidas. Manual de referencia.

Disponible en:
http://www.fao.org/docrep/005/x2570s/X2570S00.htm#TOC

Lección 14. Mecanismos de interacción suelo – contaminantes

Además de los procesos que se presentan en la interfase sólido - liquido, existen otros mecanismos de interacción entre los componentes del suelo y los compuestos contaminantes, que pueden reducir o transformar la magnitud de sus efectos. La volatilización, hidrólisis y biodegradación se destacan como los más importantes.

1. Volatilización:

La volatilización, se define como la transferencia de contaminantes desde la fase sólida o líquida, a la fase gaseosa. Los casos más típicos de volatilización de contaminantes en el suelo se presentan en compuestos orgánicos volátiles (COV´s) que poseen una alta presión de vapor y alta tendencia a gasificarse. Los bajos pesos moleculares de éstos compuestos incrementan su tendencia de volatilización, aumentando otros riesgos como la posibilidad de explosiones o incendios en zonas forestales. Los (COV´s) más frecuentes como contaminantes del suelo son: los derivados del petróleo, alcoholes, aldehídos, cetonas, disolventes y agroquímicos sobre todo compuestos organoclorados y organofosforados. Debido a que la volatilidad se incrementa con el paso de corrientes de aire, una de las técnicas usadas para la depuración de suelos contaminados es la ventilación. El cuadro 16, ilustra la volatilización potencial de algunos contaminantes del suelo y su vida media en al suelo.

Cuadro 16. Volatilización potencial de algunos (COV´s) y su vida media en el suelo. Fuente: Galán (2003).

Volatilidad potencial	Compuesto orgánico	Vida media en el suelo
Baja	Dieldrín	327 días
	3 - bromo -1 - propanol	390 días
Media	Fenantreno	31 días
	Pentaclorofenol	17 días
	Aldrín	68 horas
	Lindano	115 días
Alta	Benceno	2.7 horas
	Tolueno	2.9 horas
	O - Xileno	3.2 horas
	Tetracloruro de carbono	3.8 horas
	Bifenilo	4.3 horas
	Tricloroetileno	3.4 horas

2. Hidrólisis:

La hidrólisis se define como la ruptura de los enlaces de la molécula de agua. De ésta forma el oxígeno e hidrógeno como constituyentes se pueden unir a la molécula del compuesto contaminante y dar origen a nuevos compuestos, siendo una reacción de transformación que depende fuertemente del pH (mayor en pH ácido). La hidrólisis a diferencia de la biodegradación no requiere ser catalizada por acción microbiana. Sin embargo, la reacción del compuesto contaminante con el grupo hidroxilo incrementa la solubilidad haciendo más fácil la degradación del compuesto por parte de los microorganismos. El cuadro 17, ilustra algunos compuestos contaminantes del suelo y su resistencia o susceptibilidad a la hidrólisis.

Cuadro 17. Resistencia y susceptibilidad a la hidrólisis de compuestos orgánicos. Fuente: Galán (2003).

Compuestos resistentes a la Hidrólisis	Compuestos susceptibles de experimentar hidrólisis
Alcanos, alquenos y alquinos	Haluros de alquilo
Benceno/bifenilos	Amidas
Hidrocarburos aromáticos policiclicos	Aminas
Compuestos aromáticos halogenados	Carbamatos
Dieldrín/Aldrín y plaguicidas halogenados relacionados	Ésteres de ácidos carboxílicos
Aminas aromáticas	Nitrilos
alcoholes	Ésteres de ácido fosfórico
Fenoles	Ésteres de ácido fosfónico
Glicoles	Ésteres de ácido sulfónico
Éteres	Ésteres de ácido sulfúrico
Aldehídos	Epóxidos
Cetonas	
Ácidos carboxílicos	

3. Biodegradación:

La biodegradación se define como la transformación de compuestos orgánicos contaminantes a moléculas más simples como el CO_2 y H_2O, por acción de los microorganismos del suelo. La biodegradación de contaminantes se puede presentar de forma anaeróbica y aeróbica, siendo ésta última la más eficaz. El proceso de biotransformación es ambientalmente importante, ya que el suelo presenta mecanismos propios de resiliencia a los contaminantes actuando como autodepurador natural. La reducción de contaminantes por transformación microbiana aunque incrementa las emisiones de CO_2 a la atmósfera, permite reducir la carga contaminante a los cuerpos hídricos superficiales que son arrastrados por la escorrentía o lixiviados a los mantos acuíferos.

En la biodegradación aeróbica, los microorganismos utilizan el oxígeno del aire como aceptor de electrones y los compuestos orgánicos como fuente de energía o carbono, para así producir CO_2, H_2O y otros compuestos. En la degradación anaeróbica los microorganismos utilizan como aceptores de electrones al NO_3, SO_4, Fe^{3+}, Mn^{4+} y CO_2, para formar N_2, Mn^{2+}, S^{2+}, Fe^{2+} y CH_4 como lo muestra la figura 24.

Degradación aerobia:

$$\text{Sustrato} + O_2 \rightarrow \text{biomasa} + CO_2 + H_2O$$

Degradación anaerobia:

$$\text{Sustrato} + (NO^{3-}, SO_4^{2-}, Fe^{3+}, Mn^{4+}, CO_2) \rightarrow \text{Biomasa} + CO_2 + (N_2, Mn^{2+}, S^{2+}, Fe^{2+}, CH_4)$$

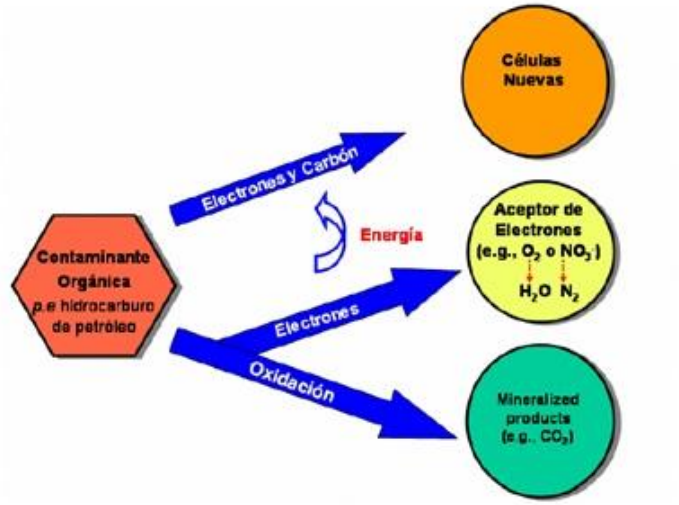

Figura 24. Esquema de la biodegradación de sustratos contaminantes en el suelo. Fuente: Field (2003).

Conceptos clave:

La interacción del suelo con los agentes contaminantes es de gran importancia, ya que permite en gran medida la depuración natural. Se destacan la volatilización, hidrólisis y biodegradación como los mecanismos más importantes.

Recursos:

Libro digital:

Galán E. (2003). Contaminación de suelos por compuestos orgánicos. Informe final. Consejería del medio ambiente de la junta de Andalucía España. 31p.

Disponible en:
http://www.ugr.es/~fjmartin/Introduccion.pdf

Lección 15. Interacción de los contaminantes del suelo con el agua subterránea.

Gran cantidad de compuestos contaminantes del suelo no sufren procesos de volatilización, hidrólisis, adsorción, oxido reducción, dilución o biodegradación; y son lixiviados a los mantos acuíferos por su alta solubilidad en el agua. Una vez los contaminantes llegan a las aguas subterráneas sufren diversos procesos de transformación, entre los que se destacan las reacciones de oxido reducción. Debido a que las aguas subterráneas se encuentran por debajo de materiales minerales del suelo y otras confinadas por la roca madre, los ambientes se caracterizan por muy bajos contenidos de oxígeno donde predomina la reducción de los compuestos contaminantes. Sin embargo, el aporte de agua desde la superficie enriquece los acuíferos con el oxígeno disuelto, favoreciendo otros procesos de oxidación por acción de los microorganismos aeróbicos presentes.

Algunos compuestos como los Sulfatos (SO_4) y Nitratos (NO_3) que son adicionados al suelo por fertilización, se infiltran hasta los acuíferos actuando como aceptores de electrones en reacciones anaeróbicas de degradación de otros compuestos orgánicos. El olor que expiden las aguas subterráneas a azufre o a pudrición, es debido a la reducción del sulfato a ácido sulfhídrico (H_2S), convirtiéndose en un compuesto indeseable. El CO_2 disuelto en las aguas subterráneas es reducido a metano (CH_4) por microorganismos anaeróbicos, lo que puede generar bolsas de gas confinadas a altas presiones. La figura 25, ilustra los diversos procesos que se presentan en el suelo, previos a la descarga de agentes contaminantes a los acuíferos.

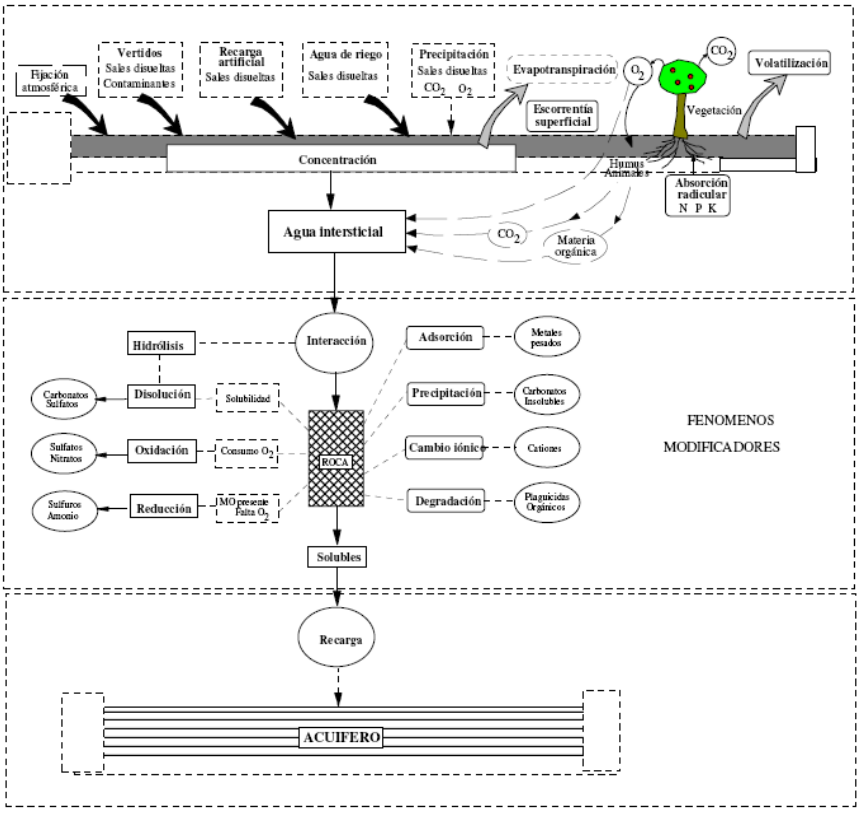

Figura 25. Procesos de interacción de sustancias contaminantes con los componentes del suelo y la atmósfera, previos a la descarga a mantos acuíferos.
Fuente: http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ15.pdf

Otro impacto ambiental en las aguas subterráneas es la contaminación por materia orgánica procedente de aguas residuales domesticas, donde la presencia de organismos asociados como los de los géneros estreptococos fecales y coliformes fecales, se utilizan como bioindicadores de calidad de las aguas (Valenzuela *et al*., 2009). En algunas poblaciones rurales donde no existe infraestructura de alcantarillado, es frecuente encontrar pozos sépticos y letrinas que en muchas ocasiones vierten los residuos fecales hasta las aguas subterráneas como lo ilustra la figura 26.

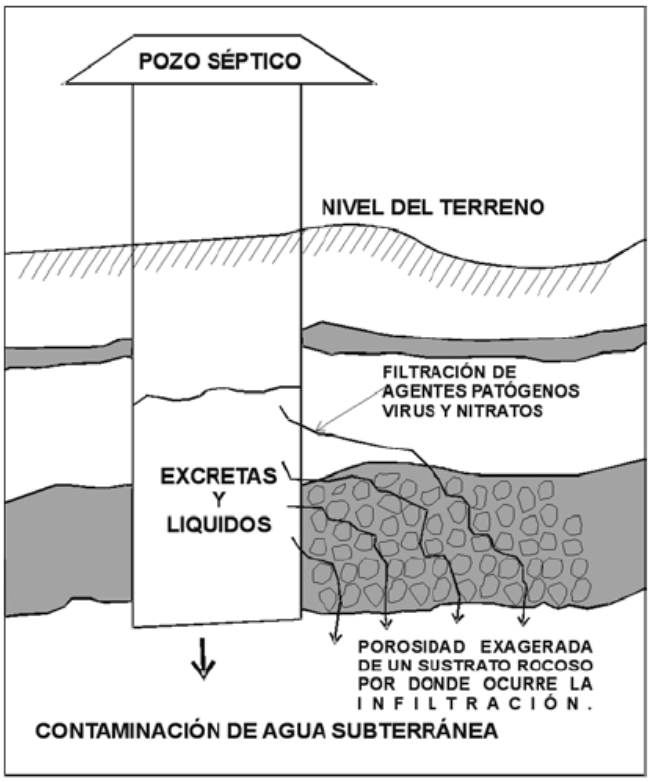

Figura 26. Modelo de contaminación de mantos acuíferos por descargas subterráneas de pozo séptico. Fuente: Gómez y Ramírez (2007).

Conceptos clave:

Algunas sustancias contaminantes son transportadas desde la superficie hasta los mantos freáticos debido a su alta solubilidad, confiriéndole gran movilidad por los poros. Las reacciones anaeróbicas predominan en éstos ambientes subterráneos, emitiendo en gran medida productos putrefactos de alta toxicidad una vez afloran en superficie, como el caso del ácido sulfhídrico (H_2S).

Recursos:

Lecturas sugeridas:

Gómez M., Ramírez R. J. (2007). Fuentes de contaminación de aguas subterráneas en la heroica ciudad de Huajuapan de León, Oaxaca México. Articulo publicado en la revista de Temas de Ciencia y Tecnología Vol. 11, No. 33, pp 23-28.

Disponible en:
http://www.utm.mx/temas/temas-docs/ensayo3t33.pdf

Valenzuela M., Claret M., Pérez C., Lagos B. (2009). Determinación del origen de la contaminación microbiológica del agua subterránea en una cuenca rural en Chile. Artículo publicado en la revista Agrociencia (43): 437 – 446.

Disponible en:
http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v43n4/v43n4a10.pdf

UNIDAD 2	
Nombre de la Unidad	**MANEJO DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO**
CAPITULO 4	**PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL SUELO**
LECCION 16	Introducción y conceptos generales de los contaminantes del suelo
LECCION 17	Contaminación por ácidos, lluvia ácida, sales y nutrientes
LECCIÓN 18	Contaminación por plaguicidas y herbicidas
LECCION 19	Contaminación por metales pesados e hidrocarburos
LECCION 20	Contaminación por microorganismos y residuos sólidos
CAPITULO 5	**MONITOREO Y PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO**
LECCION 21	Introducción y conceptos generales del monitoreo de suelos
LECCION 22	Muestreo de suelos
LECCIÓN 23	Monitoreo de suelos
LECCION 24	Indicadores de calidad ambiental de suelos
LECCION 25	Niveles de referencia y niveles de intervención de suelos contaminados
CAPITULO 6	**CONTROL Y TRATAMIENTO DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO**
LECCION 26	Introducción y conceptos generales del tratamiento de la contaminación
LECCION 27	Métodos de confinamiento y aislamiento de suelos
LECCIÓN 28	Métodos físico-químicos
LECCION 29	Métodos biológicos
LECCION 30	Normatividad ambiental

UNIDAD 2. MANEJO DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO

CAPITULO 4. PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL SUELO

Los contaminantes del suelo, son aquellas sustancias tóxicas que pueden afectar sus propiedades y deteriorar su aptitud para el desarrollo de actividades productivas. De acuerdo a lo anterior, podemos encontrar distintas sustancias y fuentes de contaminación del suelo. Las sustancias contaminantes más frecuentes en el suelo son aquellas derivadas de actividades agropecuarias como los plaguicidas y herbicidas, seguidos de compuestos orgánicos volátiles y metales pesados provenientes de actividades industriales. La composición química de los compuestos catalogados como contaminantes, es de gran importancia a la hora de evaluar los periodos de permanencia dentro del suelo, ya que aquellos que presentan anillos fenólicos y altos pesos moleculares son mas persistentes gracias a su baja solubilidad, alta adsorción y bajo potencial de degradación por los microorganismos del suelo. En éste capitulo, estudiaremos las principales fuentes de contaminación del suelo y sus características, para reconocer su trazabilidad dentro del sistema.

Lección 16. Principales contaminantes del suelo. Introducción y conceptos generales.

Las múltiples actividades de tipo socioeconómico desarrolladas por las sociedades modernas, tienden a generar residuos que de una u otra forma son vertidos o transportados hasta los cuerpos de agua y/o los suelos, convirtiéndose en contaminantes. En el suelo, la presencia de sustancias contaminantes genera procesos de degradación, ya que en muchas ocasiones éstas tienden a acumularse hasta llegar a concentraciones tóxicas para los organismos que lo habitan, lo que ocasiona una disminución de la productividad del suelo e incrementa los riesgos para la seguridad de los animales y humanos que consumen en gran medida los productos que se derivan de la actividad agrícola (García y Dorronsoro, 2002). La figura 27, ilustra como los contaminantes pueden llegar al suelo y afectar a los animales y al hombre.

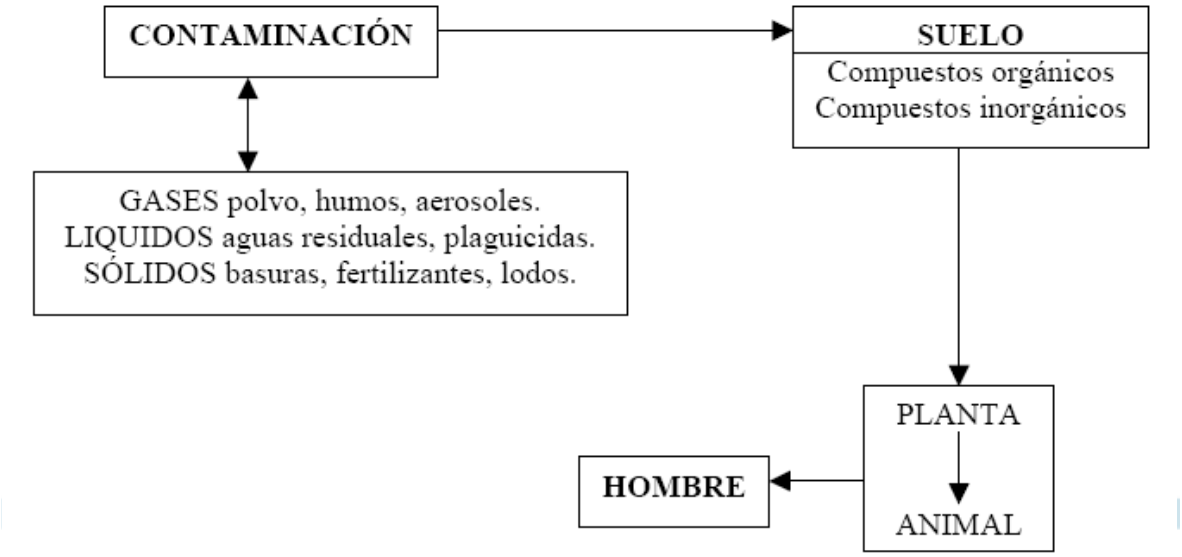

Figura 27. Trayectoria de incorporación de los contaminantes. Fuente: García y Dorronsoro (2002), adaptado de Mas y Azcue (1993).

Son varios los factores que pueden incidir en la afectación del suelo por agentes contaminantes, destacándose los siguientes:

1. ***El tipo de contaminante*:** Características de la sustancia u organismo nocivo, el grado de concentración, el nivel de toxicidad o patogenicidad, el tiempo de permanencia e interacción con el suelo y el grado de biodegradabilidad.

2. ***El clima:*** Si la llegada del contaminante al suelo se realiza en época de verano, se incrementan los procesos de volatilización. En época invernal, el incremento en la humedad favorece la hidrólisis y biodegradación, sin embargo se incrementan los riesgos de lixiviación a los mantos acuíferos.

3. ***El grado de vulnerabilidad y poder de amortiguación del suelo:*** los suelos con mayor contenido de materia orgánica y minerales de arcilla, tienden a ser menos vulnerables que los suelos de texturas gruesas, al presentar propiedades coloidales que permiten la interacción con los contaminantes como la adsorción iónica, así como albergar mayores poblaciones de organismos que pueden biodegradar algunos compuestos tóxicos y reducir las poblaciones de microorganismos patógenos por depredación o competencia. De esta forma, son suelos que tienen mayor poder de amortiguación a los impactos contaminantes.

Silva y Correa (2009) indican que la contaminación del suelo puede ser de dos tipos: local y difusa. La contaminación local va unida generalmente a actividades económicas como la minería, las instalaciones industriales y los vertederos. La contaminación difusa es causada por el transporte de sustancias contaminantes, tanto solubles como particuladas, a lo largo de amplias zonas con

frecuencia alejadas de la fuente de origen (Martínez *et al*., 2005). La figura 28, ilustra los tipos de contaminación mencionados y sus características.

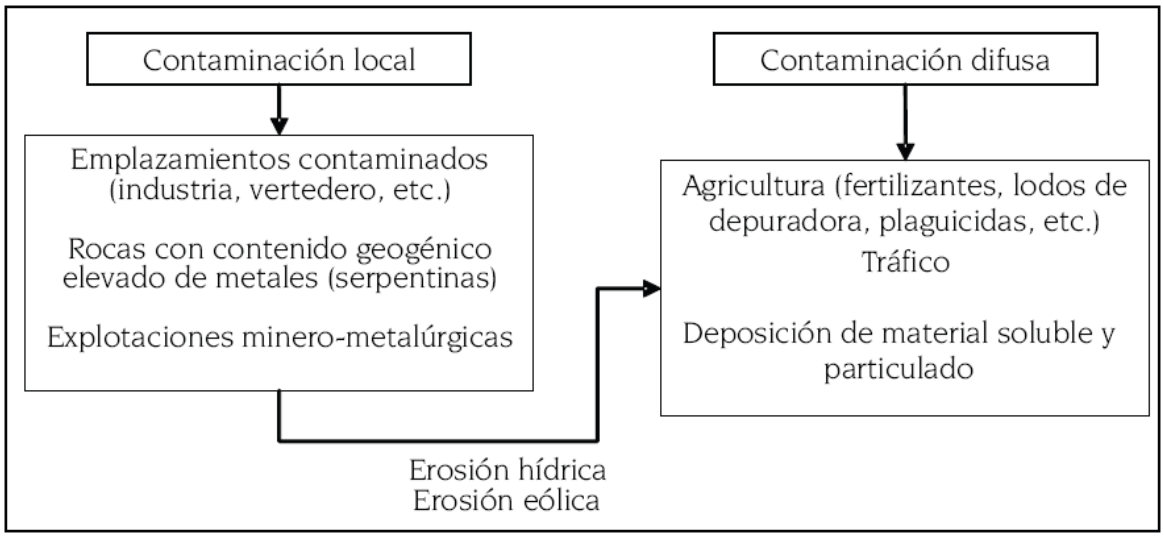

Figura 28. Tipos de contaminación del suelo. Fuente: AEMA (2002).

Algunos minerales presentes en las rocas que dan origen a muchos suelos, contienen elevados contenidos de metales que pueden llegar a causar toxicidad en las plantas y demás organismos del suelo. Éste tipo de contaminación es de origen natural, al igual que las partículas y cenizas emitidas por la actividad volcánica de la región o la presencia de sustancias ácidas que se han generado de manera natural. Un ejemplo de este tipo de contaminación, es la debida a las altas concentraciones de ácido sulfúrico en suelos cercanos a depósitos minerales de pirita.

Sin embargo, la acción antrópica es la responsable de la mayoría de vertimientos contaminantes de los suelos. Los contaminantes del suelo más frecuentes son: sustancias de tipo ácido, sales minerales, plaguicidas, herbicidas, metales pesados, hidrocarburos, residuos sólidos urbanos y microorganismos patógenos.

Conceptos clave:

La contaminación del suelo, puede ser natural o antrópica. La contaminación natural se debe a factores como la dilución de elementos tóxicos presentes en los minerales constituyentes de la roca madre del suelo, las cenizas volcánicas y las sustancias de origen natural de reactividad ácida o alcalina. La contaminación antrópica, se debe al vertimiento de sustancias tóxicas generadas por actividades humanas.

Recursos:

Lectura sugerida:

Silva S.M., Correa F.J. (2009). Análisis de La contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. Artículo publicado en la revista Semestre Económico, Volumen 12, No. 23: 13- 34.

Disponible en:
http://redalyc.uaemex.mx/pdf/1650/165013122001.pdf

Multimedia:

Página web:

García I. y Dorronsoro C. (2002). Contaminación del suelo: Contaminación del suelo e impacto ambiental. Tema 11. Universidad de Granada España, Edafología.

Disponible en:
http://edafologia.ugr.es/conta/tema11/agentes.htm

Lección 17. Contaminación por ácidos, lluvia ácida, sales y nutrientes.

El vertimiento en el suelo de sustancias de tipo ácido o alcalino, puede generar problemas de contaminación e incluso modificación de su estructura. Las actividades industriales son la principal fuente de vertimiento de sustancias de carácter ácido, como por ejemplo los ácidos sulfúrico, nítrico, fosfórico, acético, cítrico y carbónico; los cuáles pueden presentar valores de pH cercanos a 2. Algunos subproductos de la agroindustria en Colombia son muchas veces aplicados como enmiendas al suelo, generando problemas de contaminación, como el caso de la aplicación de Vinazas (residuos de destilería de alcohol carburante en el Valle del Cauca) que llegan a tener valores de pH cercanos a 4.

De otra parte, la emisión de gases contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y azufre (SO_2) producidos por la combustión incompleta en las industrias y los vehículos automotores, generan en la atmósfera reacciones de hidrólisis cuando se mezclan con el vapor de agua, formando sustancias como los ácidos nítrico y sulfúrico, que posteriormente se precipitan al suelo con las lluvias. La presencia de sustancias de tipo ácido en el suelo puede llegar a modificar parcialmente el pH haciendo solubles algunos elementos tóxicos para las plantas como el Aluminio (Ortiz *et al*., 2007). La figura 29, ilustra el proceso de formación de la lluvia ácida.

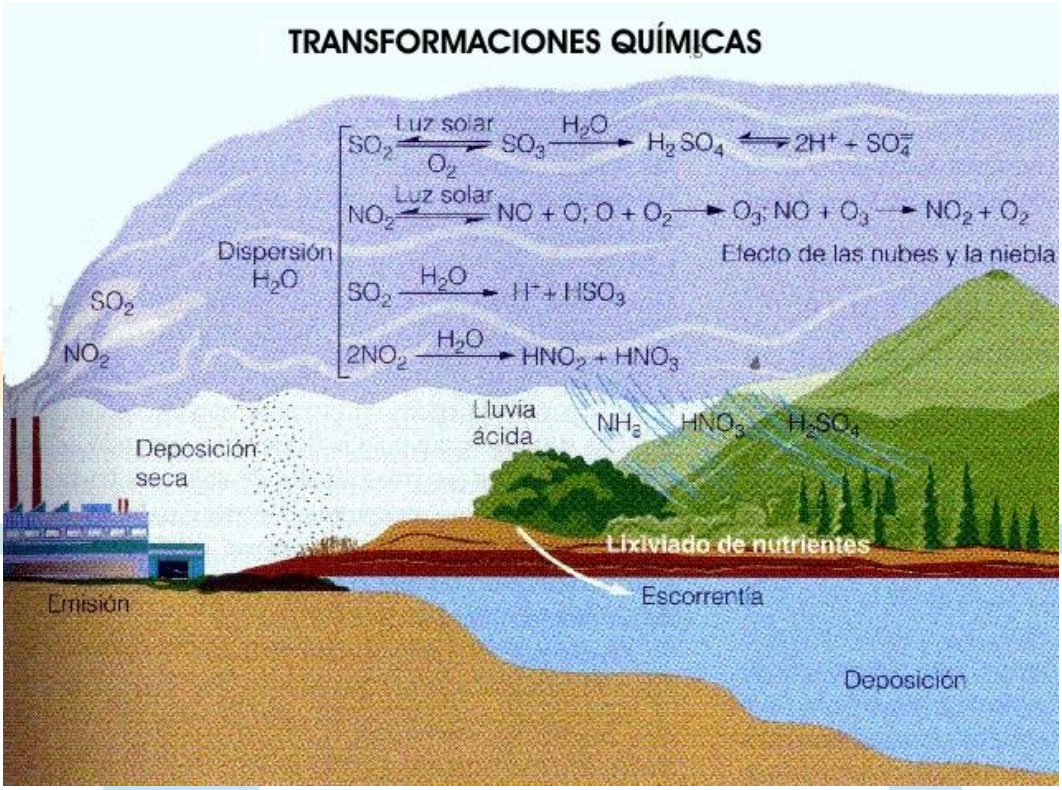

Figura 29. Formación de lluvia ácida.
Fuente: http://www.sagan-gea.org/hojared/Hoja13.htm

La salinización de los suelos se puede dar de forma natural o antrópica. A nivel natural, las zonas secas donde la tasa de evapotranspiración es mayor a la precipitación tienden a acumular sales en superficie debido al ascenso por capilaridad de sustancias salinas provenientes de los materiales parentales del suelo, como las sales de calcio, sodio y magnesio. La continua aplicación de fertilizantes en la agricultura sobre todo en zonas secas donde el agua es un limitante, genera problemas de salinización de los suelos por causa de la acumulación en superficie de compuestos como los carbonatos, sulfatos, nitratos y cloruros; o por causa de la lixiviación y contaminación de las aguas subterráneas (aguas duras) que son reincorporadas por bombeo como agua de riego. La figura 30, muestra un suelo contaminado por sales.

Figura 30. Suelo contaminado por sales. Fuente: INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina). Enlace: http://www.inta.gov.ar/mjuarez/info/documentos/extension/lab_recup_suelos08.htm

La acumulación de sales en superficie tiene efectos nocivos sobre las plantas y los organismos del suelo, ya que se incrementa la presión osmótica del medio generando ruptura de las células y muerte del organismo. En la agricultura, los niveles de salinidad del suelo medido a través de su conductividad eléctrica, se consideran moderados a altos cuando sobrepasan los 2 $dS.m^{-1}$ generando toxicidad en las plantas y estrés por pérdida de agua en su zona radical. Algunos suelos, tienden a acumular sales de sodio como los carbonatos y bicarbonatos, generando disgregación y pérdida de la estructura, así como toxicidad en algunos vegetales. Algunas plantas son más resistentes o susceptibles a la presencia de compuestos salinos, que otras. El cuadro 18, muestra el grado de tolerancia de algunas especies cultivables a niveles de salinidad del suelo.

Cuadro 18. Tolerancia de algunas plantas a la salinidad del suelo. Los valores numéricos corresponden a rangos de conductividad eléctrica en $dS.m^{-1}$ (deci Siemens por metro). Fuente: Jaramillo (2002).

Alta (10 -18)	Media (6 - 9)	Baja (2 - 5)
Palma Datilera	Tomate	Pera
Remolacha	Repollo	Manzana
Espárrago	Coliflor	Naranja
Pasto Bermuda	Lechuga	Fresa
Cebada	Zanahoria	Rábano
Algodón	Cebolla	Apio
	Trigo	Habichuela
	Avena	Habas
	Arroz	
	Maíz	
	Sorgo	
	Girasol	

Conceptos clave:

El vertimiento en el suelo de sustancias de tipo ácido o alcalino, puede generar problemas de contaminación e incluso modificación de su estructura. La excesiva fertilización del suelo genera la acumulación de sales en superficie. La polución del aire con gases provenientes de la combustión, puede generar compuestos ácidos en la atmósfera que posteriormente se precipitan al suelo con las lluvias.

Recursos:

Lectura:

Ortiz I., Sanz J., Dorado M., Villar S. (2007). Lluvia ácida. En Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de vigilancia tecnológica. Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía CITME. Universidad de Alcalá España. Página 14.

Disponible en:
http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf

Lección 18. Contaminación por plaguicidas y herbicidas.

El desequilibrio ecológico causado por la intervención de bosques y selvas tropicales para la introducción de monocultivos, genera algunos efectos como el incremento de poblaciones de organismos que se benefician del material vegetativo así como de sus frutos. A éstos organismos se les denomina "plaga" ya que afectan las plantas, bien sea por su carácter herbívoro o por ser transmisores de algunas enfermedades fúngicas, bacterianas o virales; siendo combatidos por sustancias biocidas (denominadas plaguicidas) que son específicas para cada grupo de insectos, ácaros, arácnidos, moluscos, entre otros.

Sin embargo, los efectos producidos con la aplicación de los plaguicidas en los cultivos no cesan de forma inmediata, ya que estas sustancias al ser solubles en agua pueden ser arrastradas por las lluvias o el riego hasta llegar al suelo y las aguas subterráneas, generando un problema de contaminación. Otro problema causado por la aplicación de plaguicidas es la contaminación difusa de corrientes superficiales de agua y su dispersión en el aire, lo que puede ocasionar enfermedades digestivas y respiratorias. La figura 31, ilustra como el suelo se convierte en un medio de regulación de las sustancias químicas aplicadas en la agricultura convencional.

Figura 31. El suelo como regulador de sustancias químicas aplicadas en la agricultura.
Fuente: García y Dorronsoro (2002).
Enlace: http://edafologia.ugr.es/conta/tema13/clasif.htm#anchor501806

Otro tipo de sustancias químicas son usadas en la agricultura para regular el crecimiento de especies herbáceas que acompañan los cultivos de interés económico y que de una u otra forma le hacen competencia bien sea por luz o por nutrientes, disminuyendo su rendimiento. Estas sustancias se denominan Herbicidas, ya que controlan hierbas.

La mayoría de los agroquímicos (pesticidas y herbicidas) son derivados de compuestos orgánicos, heterocíclicos y de la Urea (nitrato de amonio) lo que eleva su poder tóxico, incluso en dosis bajas. El parámetro DL_{50} indica la dosis letal media, que corresponde con la cantidad de plaguicida capaz de causar la muerte al 50% de los individuos que constituyen el lote del ensayo (García y Dorronsoro, 2002). El cuadro 19, muestra la categorización de toxicidad de los plaguicidas según valores del DL_{50}.

Cuadro 19. Categoría de toxicidad de pesticidas, según su valor de DL50. Fuente: (García y Dorronsoro, 2002).

Categoría	Valores del DL_{50} como concentración en solución
Supertóxicos	< 5 mg/kg
Extremadamente tóxicos	5 - 50 mg/kg
Muy tóxicos	50 - 500 mg/kg
Moderadamente tóxicos	500 - 5000 mg/kg
Ligeramente tóxicos	5 - 15 g/kg
Prácticamente no tóxicos	> 15 g/kg

Algunos pesticidas como el TEPP (Tetraetil pirofosfato), Paratión, Metil paratión, DDVP (2, 2 dicloro dimetil fosfonato), Lindano, Heptacloro y el DDT (Dicloro Difenil Tricloroetano); son considerados entre muy tóxicos a supertóxicos, según lo ilustra la figura 32.

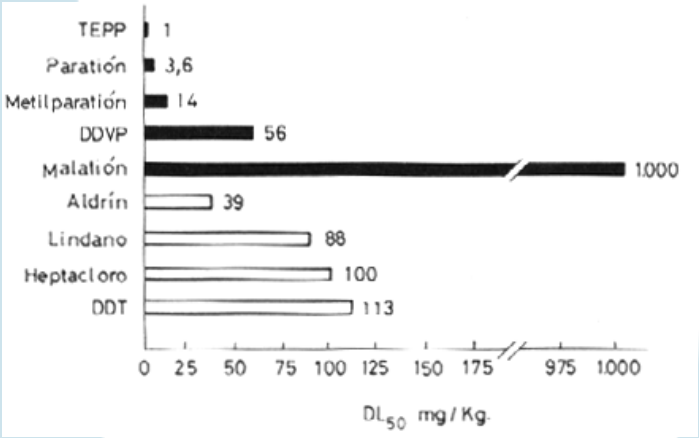

Figura 32. Toxicidad relativa de algunos plaguicidas organofosforados y organoclorados. Fuente: Sánchez M. y Sánchez C. (1984).

Una vez estos compuestos llegan al suelo pueden generan efectos nocivos sobre los organismos presentes, ya que en muchas ocasiones su acción es de amplio espectro al no discriminar su efecto biocida. De esta forma se afecta la vida del suelo, ocasionando disminución de procesos bióticos

importantes como la descomposición, mineralización, humificación y la regulación de otros microorganismos fitopatógenos.

Existen algunos mecanismos naturales de depuración de la contaminación del suelo por plaguicidas, como por ejemplo su volatilización y adsorción por formación de complejos con los coloides del suelo, en especial con la materia orgánica, lo que reduce el impacto de contaminación de las aguas subterráneas como lo hemos señalado en lecciones anteriores. Pero el mecanismo de biodegradación de estas sustancias es quizá el más importante, debido a que los productos finales son el CO_2 y el H_2O que se reintegran con mayor facilidad al ecosistema. Sin embargo, no todos los suelos tienen alta capacidad de degradación biológica de contaminantes plaguicidas puesto que algunas condiciones adversas como bajos contenidos de materia orgánica, salinización y acidificación, reducen la vida del suelo, afectando los procesos de depuración.

Conceptos clave:

La aplicación de sustancias en la agricultura para el control de plagas y hierbas acompañantes, genera contaminación del suelo ya que al ser altamente solubles en agua pueden movilizarse con facilidad por el perfil. El parámetro DL_{50} indica la dosis letal media, que corresponde con la cantidad de plaguicida capaz de causar la muerte al 50% de los individuos que constituyen el lote del ensayo.

Recursos:

Multimedia:

Página web:

García I. y Dorronsoro C. (2002). Contaminación del suelo: Contaminación por fitosanitarios: pesticidas. Tema 13. Universidad de Granada España, Edafología.

Disponible en:
http://edafologia.ugr.es/conta/tema13/clasif.htm#anchor501806

Libro digital:

Sánchez M. y Sánchez C. (1984). Los plaguicidas, adsorción y evolución en el suelo. Instituto de recursos naturales y agrobiología. Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC. Edición electrónica promovida por Ceres Net. Salamanca España. 51p.

Disponible en:
http://digital.csic.es/bitstream/10261/12919/1/plaguicidas.pdf

Lección 19. Contaminación por metales pesados e hidrocarburos.

Metales pesados

La contaminación del suelo por metales pesados puede provenir de distintas actividades económicas que se desarrollan en las ciudades y que por alguna razón generan residuos metálicos. Estos residuos, llegan finalmente al suelo para quedar retenidos o acomplejados por las partículas coloidales o en algunos casos llegan a contaminar las aguas subterráneas por su alta movilidad en el perfil, sobre todo en suelos con texturas gruesas. El cuadro 20, ilustra la procedencia de algunos elementos metálicos, según su uso en actividades económicas.

Cuadro 20. Procedencia de los metales según su uso en actividades económicas y/o industriales. Fuente: Sabroso y Pastor (2004).

METAL	USOS
Ag Plata	Fotografía, conductores eléctricos, soldadura, galvanización, acuñación, baterías, catalizador.
Al Aluminio	Construcción, transporte, envasados, industrias eléctrica y farmacéutica
As Arsénico	Medicina, veterinaria, aleaciones, pirotecnia, esmaltes, insecticidas, pigmentos, pintura, productos electrónicos, tintes
Cd Cadmio	Galvanización, pigmentos, baterías, aleaciones de bajo punto de ebullición
Co Cobalto	Aleaciones, pigmentos, esmaltes, barnices, galvanización.
Cr Cromo	Metalurgia, materiales refractarios, galvanización, curtidos, pinturas, conservación de madera, industria química.
Cu Cobre	Industrias eléctrica y automovilística, construcción, fontanería, latón, algicidas, conservación de madera.
Fe Hierro	Industrias del hierro y acero
Hg Mercurio	Producción de cloruro y sosa cáustica, insecticidas, industrias farmacéutica y metalúrgica, odontología, catalizador en producción de polímeros sintéticos.
Mn Manganeso	Metalurgia, baterías, industria química, cerámica.
Mo Molibdeno	Metalurgia, pigmentos, catalizador, fabricación de vidrio, aditivo en óleos lubrificantes.
Ni Níquel	Metalurgia, baterías, equipos solares, galvanización, catalizador en la producción de aceite combustible.
Pb Plomo	Baterías, gasolina, pigmentos, munición, soldadura, pintura, industria automovilística
Sb Antimonio	Plásticos, cerámica, vidrios, pigmentos, productos químicos incombustibles.
V Vanadio	Metalurgia, catalizador, pigmentos.
Zn Cinc	Aleaciones, bronce y latón, galvanización, baterías, pintura, productos agrícolas, cosméticos y medicinales

Tradicionalmente se llama metal pesado a aquel elemento metálico que presenta una densidad superior a 5 $g.cm^{-3}$, aunque a efectos prácticos en estudios medioambientales se amplía esta definición a todos aquellos elementos metálicos o metaloides, de mayor o menor densidad, que aparecen comúnmente asociados a problemas de contaminación. Algunos de ellos son esenciales para los organismos en pequeñas cantidades como el Fe, Mn, Zn, B, Co, As, Cu, Ni o Mo, y se vuelven nocivos cuando se presentan en concentraciones elevadas, mientras que otros no desempeñan ninguna función biológica y resultan altamente tóxicos, como el Cd, Hg o el Pb (Ortiz *et al*., 2007).

La especiación de metales pesados en el suelo define en que forma o especie química se encuentran, de tal manera que permite indicar su potencial de solubilidad, movilidad, disponibilidad para degradación, adsorción, acomplejamiento y toxicidad; lo que esclarece su acción contaminante. El humus del suelo, constituido por humina y sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) tiene la capacidad de acomplejar o de formar quelatos con algunos metales presentes en la fase de intercambio, pudiendo así retener o liberar estos contaminantes.

De otro lado, la dinámica, movilidad y disponibilidad de los metales en el suelo está muy influenciada por el pH y las condiciones redox (ambientes anegados) (Lloyd y Macaskie, 2000). El cuadro 21. Ilustra la movilidad de algunos metales pesados en el suelo, con base a condiciones de pH y ambientes de oxido reducción.

Cuadro 21. Movilidad relativa de algunos metales pesados en el suelo, de acuerdo a condiciones de pH (ácido, neutro o alcalino) y a condiciones de oxidación (buena aireación) o reducción (condiciones de anegamiento). Fuente: Plant y Raiswell (1983)

Movilidad	Oxidación	Acido	Neutro y alcalino	Reducción
Alta	Zn	Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au		
Media	Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, Cd	Cd	Cd	
Baja	Pb	Pb	Pb	
Muy baja	Fe, Mn, Al, Sn, Pt, Cr, Zr	Al, Sn, Pt, Cr	Al, Sn, Cr, Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au, Cd, Pb

Debido a su amplia dinámica en el suelo, los metales pesados pueden llegar a absorberse por medio de la vegetación y bioacumularse en los tejidos de algunas plantas y animales, generando procesos de biomagnificación en la cadena trófica, como por ejemplo la presencia de mercurio (Hg) en tejidos de algunos peces de río y en el atún en el mar, lo que puede ocasionar riesgos en la salud humana

ya que algunos de ellos se convierten en agentes cancerígenos. La figura 33, muestra como es el la dinámica de los metales pesados en el suelo y el riesgo de acumulación en las cadenas tróficas.

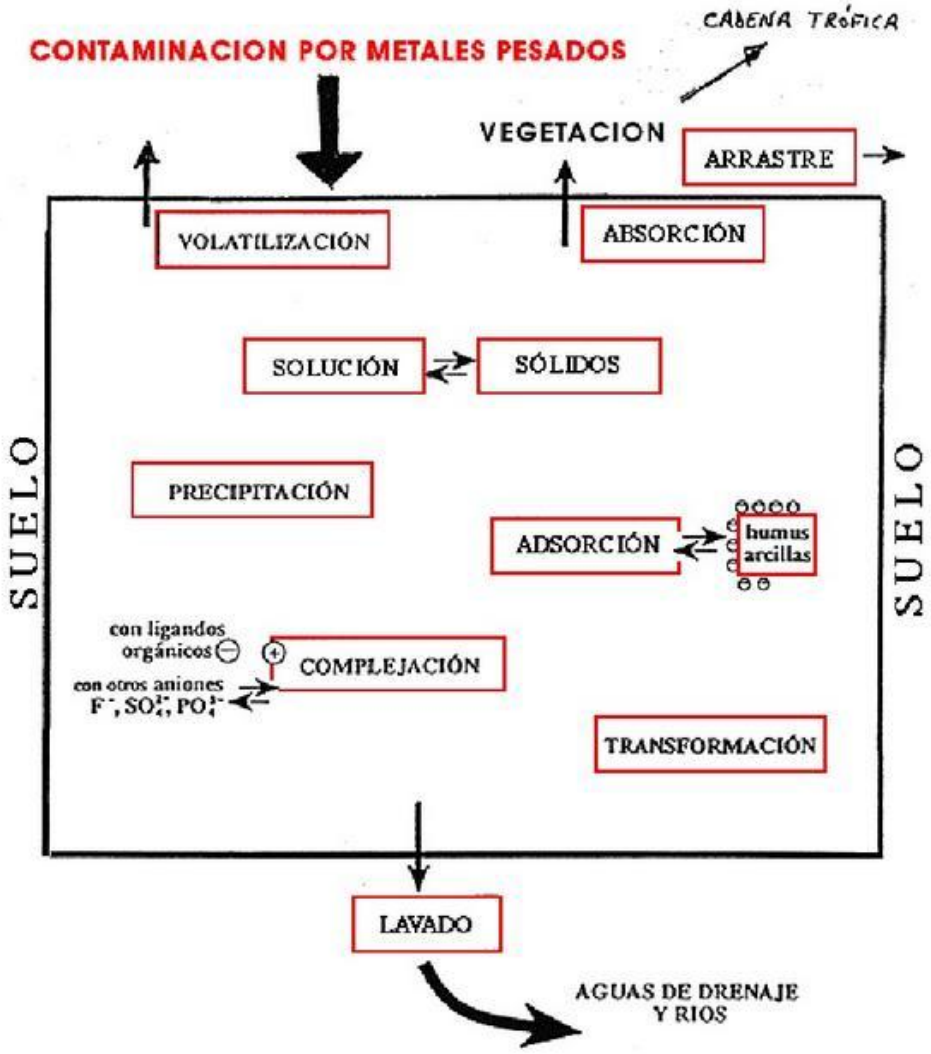

Figura 33. Dinámica de los metales pesados en el suelo y el riesgo de contaminación de acuíferos y de biomagnificación en las redes tróficas.
Fuente: http://edafologia.ugr.es/conta/tema15/dina.htm

Contaminación por hidrocarburos

La contaminación del suelo por compuestos derivados del petróleo es de amplia gama, ya que existen diversas sustancias que van desde el crudo mismo hasta otros subproductos como la gasolina, el diesel, los aceites, el alquitrán y algunos polímeros plásticos. Sin embargo, casi todos presentan la misma estructura química básica de compuestos aromáticos policíclicos como el caso del Benzo pireno (Sabroso y Pastor, 2004).

Los compuestos del petróleo de menor peso molecular incluyen a los hidrocarburos gaseosos como el metano, etano, propano, butano y pentano, así como gasolinas de refinería, los cuáles gracias a su alta presión de vapor se volatilizan rápidamente. Otros hidrocarburos de mayor peso molecular incluye a los aceites, que permanecen mayor tiempo en el suelo sufriendo en algunos casos biodegradación lenta por los microorganismos debido su baja solubilidad en el agua, lo que dificulta su biodisponibilidad. El benceno es otro compuesto derivado del petróleo que es procesado a nivel industrial, siendo un compuesto aromático de alta toxicidad y riesgo por su acción cancerígena. Los bifenilos, son quizá los compuestos más resistentes ya que están formados por anillos fenólicos de alta estabilidad lo que hace difícil su biodegradación. La figura 34, ilustra el impacto de la contaminación del suelo por derrame de hidrocarburos.

Figura 34. Fotografía aérea de zona afectada por derrame de hidrocarburos.
Fuente: http://www.agroforestalsanremo.com/galerias/

Conceptos clave:
La contaminación del suelo por metales pesados puede provenir de distintas actividades económicas que se desarrollan en las ciudades y que por alguna razón generan residuos metálicos. La especiación de metales pesados define en que forma o especie química se encuentran, de tal manera que permite indicar su potencial de solubilidad, movilidad, disponibilidad para degradación, adsorción, acomplejamiento y toxicidad; lo que esclarece su acción contaminante.

La contaminación del suelo por compuestos derivados del petróleo es de amplia gama, ya que existen diversas sustancias que van desde el crudo mismo hasta otros subproductos como la gasolina, el diesel, los aceites, el alquitrán y algunos polímeros plásticos. La degradabilidad de los hidrocarburos dependerá de su solubilidad en agua y de la ausencia de anillos fenólicos que lo hacen recalcitrante.

Recursos:

Libros electrónicos:

Sabroso M.C., Pastor A. (2004). Guía sobre suelos contaminados. Confederación de pequeña y mediana empresa Aragonesa. Aragón España. 109p.

Disponible en:
http://www.conectapyme.com/files/medio/guia_suelos_contaminados.pdf

Multimedia:

Video:

Mortandad de peces en el Río Agrio de Aznalcóllar Andalucía España, por contaminación de las aguas con metales pesados provenientes de la minería. Producido por Ecologistas tv (Blog Gerena Verde).

Enlace:
http://www.youtube.com/watch?v=Pwb03KGMOFc

Resumen:

En el video se ilustra como ha sido el impacto de la contaminación del recurso hídrico en la zona de Aznalcóllar España, por el uso de sustancias tóxicas como el mercurio y el cianuro en la minería de ésta región, viéndose reflejada en la mortandad de peces y crustáceos.

Lección 20. Contaminación por microorganismos patógenos y residuos sólidos.

La contaminación del suelo por agentes microbianos patógenos y residuos sólidos, se deriva de actividades humanas. El vertimiento en el subsuelo de aguas residuales provenientes de zonas residenciales y la producción pecuaria, generan gran impacto por la carga microbial presente en las heces fecales, destacándose microorganismos como los coliformes fecales y algunos estreptococos. Otro organismo de alto riesgo como la Salmonella *spp*., está presente en la industria de curtiembres y la agroindustria de cárnicos, pudiendo llegar al suelo por descargas. La aplicación de riego con aguas contaminadas con bacterias patógenas genera contaminación del suelo, al igual que el uso de lodos de plantas de aguas residuales como enmiendas, ya que presentan elementos nocivos como metales pesados y microorganismos patógenos. El excesivo uso de agroquímicos para combatir enfermedades fúngicas y bacterianas en las plantas, produce resistencia en algunas cepas de microorganismos causando su proliferación y riesgo para la sanidad vegetal, animal y humana; como el caso de *Fusarium oxysporum* que es un hongo altamente resistente y puede permanecer en

estado de latencia por más de diez años en el suelo, afectando los cultivos. El cuadro 22, ilustra algunos organismos del suelo que son patógenos en determinados cultivos.

Cuadro 22. Organismos del suelo que se convierten en patógenos para los cultivos.
Fuente: http://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol16num1/articulos/microorganismos/micro.htm

PATÓGENO	CULTIVO
Bacterias	
Erwinia carotovora	Papa
Erwinia tracheiphila	Pepino
Hongos	
Phytopthora spp	Soya, papa
Pythium spp	Trigo y lechuga
Rhizoctonia solani	Algodón, papa y cacahuate
Sclerotium rolfsii	Tomate
Verticillum dahliae	Papa
Colletotrichum orbiculare	Pepino
Fusarium oxysporum	Pepino, papaya, jitomate
Alternaria alternata	Manzano
Nematodos	
Onconomella xenoplax	Melocotón
Heterodera glycines	Soya
Meloidogyne incógnita	Algodón, pepino, cacahuate y tomate
Virus	
Virus del mosaico	Pepino
Virus del mosaico	Tomate

Otro caso de contaminación del suelo por agentes microbianos se presenta con la adición de microorganismos eficientes (E.M.) en la agricultura, los cuáles son altamente competitivos, pudiendo desplazar otras poblaciones benéficas del suelo e incluso consumir materiales orgánicos como el humus vía mineralización.

Residuos sólidos

La concentración humana en las ciudades genera grandes cantidades de residuos sólidos, que finalmente, son dispuestos en rellenos sanitarios y/o botaderos a cielo abierto. Otros residuos llegan a los cuerpos de agua por falta de conciencia de los pobladores generando mayor impacto ambiental. En Colombia la producción de residuos sólidos urbanos es de aproximadamente 28.500 ton/día, distribuidas en actividades residenciales, comerciales, industriales, institucionales, de construcción y otras, como lo ilustra la figura 35.

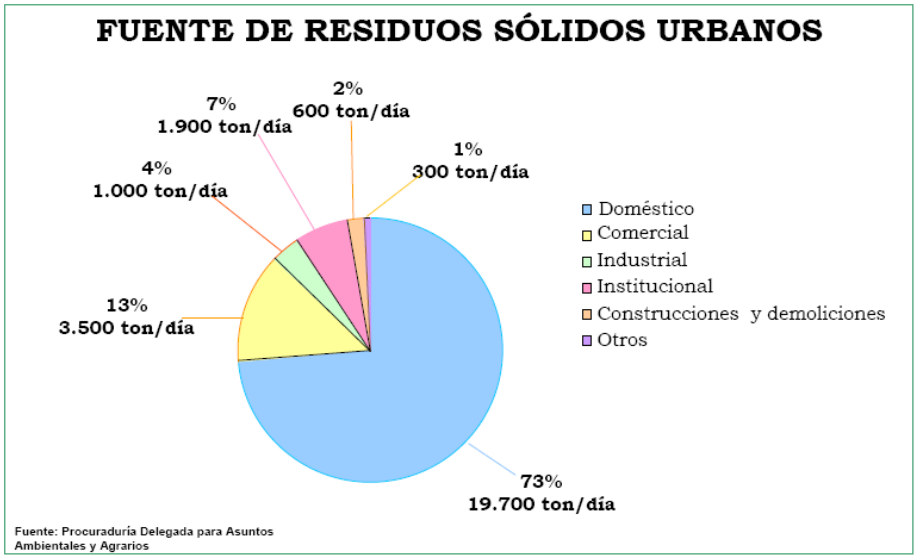

Figura 35. Fuente de residuos sólidos urbanos en Colombia. Fuente: Contreras (2006), tomado de la procuraduría delegada para asuntos ambientales y agrarios de Colombia.

Los residuos que son depositados en suelos de rellenos sanitarios o botaderos a cielo abierto, contienen principalmente materiales orgánicos, plástico, vidrio, papel, cartón, madera, metal y textiles. Estos materiales están hechos de diversos compuestos químicos que son nocivos en el suelo como lo ilustra el cuadro 23.

Cuadro 23. Componentes de algunos materiales presentes en los residuos sólidos urbanos. Fuente: Gómez y Ramírez (2007).

Materiales	Residuos
Tenis con burbujas	Mercurio.
Envases de plástico	Cloro, azucares, ácidos, alcoholes, etc.
Medicamentos	Sustancias de diferente composición química.
Pilas	Mercurio, dióxido de manganeso, carbono, zinc, óxidos de plata; mercurio; litio y cadmio, entre otros muchos elementos.
Baterías de automóviles	Plomo, óxido de plomo y ácido sulfúrico.
Envases de lubricantes	Compuestos parafínicos, nafténicos, aromáticos y otros aditivos.
Detergentes	Carbonatos, sulfatos de sodio, enzimas, colorantes, perfumes, etc.
Compuestos sintéticos	Solventes, pesticidas, pinturas, barnices, gasolinas, nitratos etc.
Desechos orgánicos	Producen agentes patógenos, virus, protozoarios, etc.

Los lixiviados que desprenden los residuos sólidos en sitios de disposión final, pueden generar impactos por contaminación de acuíferos en suelos con alta permeabilidad. La presencia de metales pesados, microorganismos patógenos y sustancias ácidas en los lixiviados, genera altas demandas bioquímicas de oxígeno (DBO) lo que ocasiona la muerte de especies acuáticas una vez llegan a corrientes superficiales. La figura 36, ilustra como los lixiviados de las basuras pueden llegar a las aguas subterráneas y causar un problema grave de contaminación.

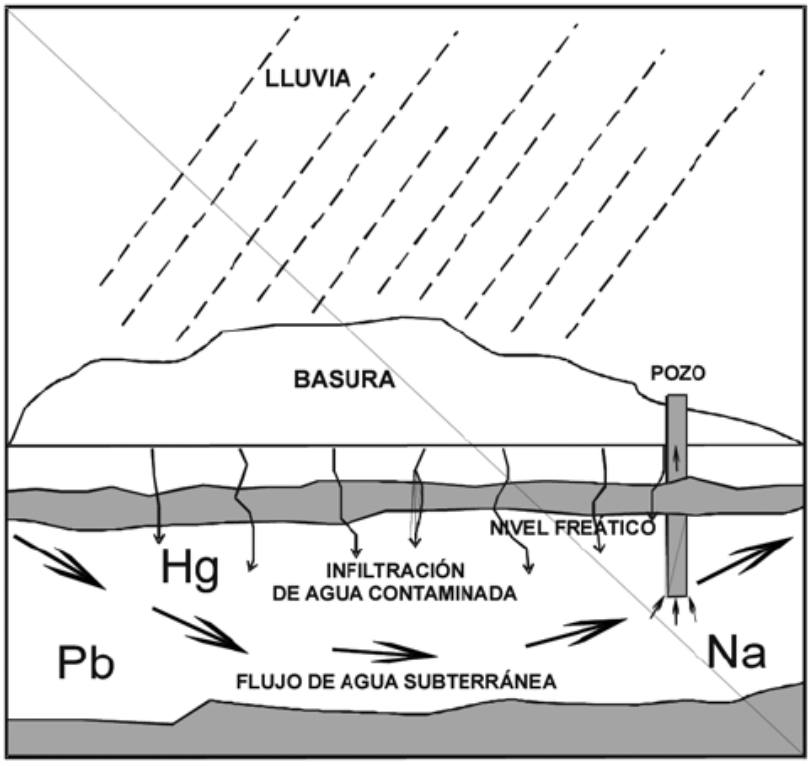

Figura 36. Modelo de contaminación de las aguas subterráneas por efecto del agua de lluvia en contacto con materiales de basurero. Fuente: Gómez y Ramírez (2007).

Conceptos clave:
La contaminación del suelo por agentes microbianos patógenos y residuos sólidos, se deriva de actividades humanas. El vertimiento en el subsuelo de aguas residuales provenientes de zonas residenciales y la producción pecuaria, el uso de aguas contaminadas para el riego y el manejo de suelos con enmiendas provenientes de lodos residuales, generan gran impacto en el suelo por la carga microbial presente.

Los lixiviados que desprenden los residuos sólidos en sitios de disposión final, pueden generar impactos por contaminación de suelos y acuíferos. La presencia de metales pesados, microorganismos patógenos y sustancias ácidas en los lixiviados, genera altas demandas bioquímicas de oxígeno (DBO) lo que ocasiona la muerte de especies acuáticas una vez llegan a corrientes superficiales.

Recursos:

Lectura sugerida:

Puerta E. S.M. (2005). Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos. Articulo de revisión publicado en la revista Lasallista de investigación No. 1. Vol. (1): 56- 65.

Disponible en:
http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/Vol1n1/056-65%20Los%20residuos%20s%C3%B3lidos%20municipales%20acondicionadores%20del%20suelo.pdf

Libro digital:

Contreras C. (2006). Manejo integral de Aspectos ambientales. Diplomado en gestión ambiental empresarial para funcionarios de ETB. Pontificia universidad Javeriana.

Disponible en:
http://www.javeriana.edu.co/ier/recursos_user/IER/documentos/OTROS/Pres_Residuos_CamiloC.pdf

CAPITULO 5. MONITOREO Y PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO

El diagnóstico y monitoreo, se constituyen en herramientas clave a la hora de evaluar el grado de afectación de la presencia de sustancias contaminantes en el suelo. La capacidad del investigador para poder seleccionar las zonas de muestreo así como las técnicas de medición, es fundamental ya que le permite por un lado tener mayor acercamiento de la realidad, y por el otro, economizar recursos que pueden ser utilizados en la ejecución de técnicas de mitigación y control. Por ésta razón, nos centraremos en conocer las diferentes técnicas de muestreo del suelo, las formas de evaluar la magnitud de la contaminación y en deducir la importancia del diseño de monitoreos periódicos para evaluar la dinámica de los contaminantes en el tiempo y el espacio.

Lección 21. Introducción y conceptos generales del monitoreo de suelos.

Como mencionamos en lectores anteriores, la contaminación del suelo genera pérdida de su potencial productivo debido a la afectación de algunas de sus propiedades. Por este motivo, se justifica el uso de mecanismos diagnósticos como herramientas a la hora de tomar medidas tendientes a prevenir, mitigar y controlar los impactos generados por los agentes contaminantes. El monitoreo de algunas propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, permite tener un estimativo de la concentración y comportamiento de las sustancias causales de contaminación, con miras a tener puntos de comparación con respecto a niveles críticos establecidos en la normatividad ambiental vigente.

De ésta forma se podrán estudiar medidas correctivas, que busquen en primera instancia detectar los focos de contaminación y reducir la carga contaminante. Una vez identificados los contaminantes, es necesario el análisis de las características generales del suelo como la textura, porosidad, pH y contenido de materia orgánica, con el fin de establecer de que forma puede estar interactuando el contaminante con las interfases sólida, líquida y gaseosa, de acuerdo a lo estudiado en lecciones anteriores.

La toma de muestras replicadas en el tiempo, permitirá observar la evolución del contaminante en el suelo. Si la concentración del contaminante se incrementa o permanece constante, es señal de que el afluente no ha cesado su flujo contaminante hacia el suelo o que además el compuesto sea recalcitrante (poco biodegradable) y se acumule. Si la concentración del contaminante del suelo tiende a reducirse en el tiempo, es posible que algunos mecanismos propios como la volatilización, precipitación, hidrólisis o biodegradación, estén actuando a favor de su depuración. Sin embargo, es probable que la reducción del contaminante en la superficie del suelo sea causada por la alta solubilidad del compuesto en el agua y su posible infiltración hacia horizontes más profundos o las aguas subterráneas. Por esta razón, se aconseja el monitoreo del suelo a distintas profundidades en el perfil con miras a identificar su posible movilidad.

El monitoreo de la contaminación del suelo, tiene como objetivo le servir de base en la identificación, investigación e intervención del suelo contaminado, mediante el uso de herramientas tecnológicas, como lo ilustra la figura 37. Una vez aplicada ésta metodología se puede definir si el suelo está alterado, contaminado, recuperado o simplemente no presenta contaminación.

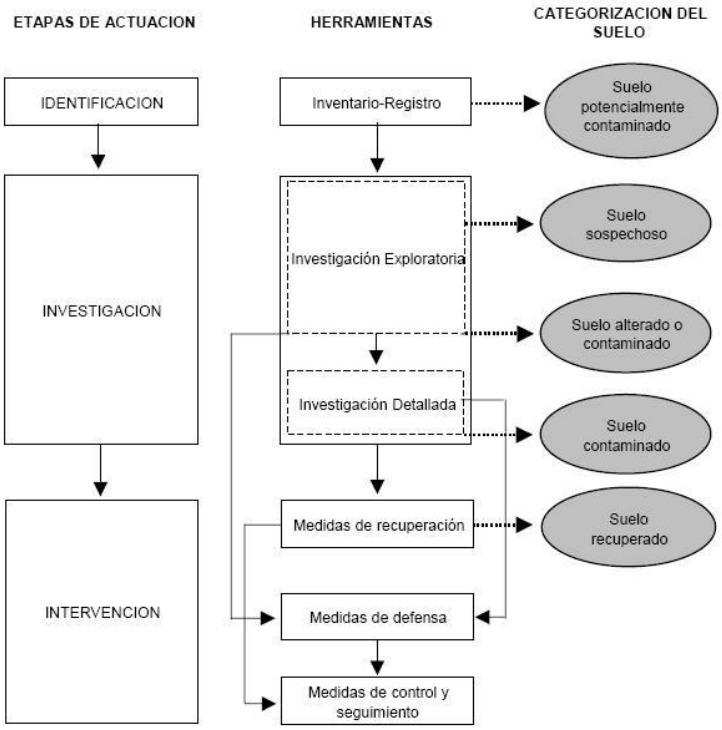

Figura 37. Etapas de actuación y herramientas tecnológicas que caracterizan el monitoreo de suelos contaminado. Fuente: Ezkurra (2008).

Los criterios de decisión acerca de las medidas a tomar en caso de encontrar trazas contaminantes en el suelo, son criterio del investigador o ente de regulación ambiental. Algunas medidas extremas pueden ser tomadas, como por ejemplo declarar la zona contaminada en cuarentena y evacuar a la comunidad residente, con miras de prevenir los riesgos a la salud humana.

Las medidas de control de la contaminación del suelo abarcan un amplio abanico de posibilidades, las cuáles van desde controles simples hasta el uso de tecnología de punta con altos costos en equipos y gastos energéticos. Sin embargo, la disponibilidad de recursos, la magnitud del impacto causado y las condiciones de la zona, serán los principales aspectos a tener en cuenta, como lo veremos más adelante.

Conceptos clave:

El diagnóstico de la contaminación del suelo y la dinámica de los contaminantes, es muy importante a la hora de tomar decisiones tendientes al diseño de medidas de mitigación y control. El muestreo periódico de la concentración de variables clave y su posterior comparación con los valores máximos permisibles por la normatividad ambiental, son los aspectos más relevantes.

Recursos:

Libro digital:

Ezkurra I. (1998). Investigación de la contaminación del suelo. Manual práctico. Sociedad pública de gestión ambiental IHOBE. Gobierno Vasco. 102p.

Disponible en:
http://www.ingenieroambiental.com/Manual_Suelos.pdf

Lección 22. Muestreo de suelos.

La caracterización de un suelo contaminado implica estrategias metodológicas que permitan tener un mejor acercamiento de la realidad y menor sesgo a la hora de estimar las variables requeridas. En éste sentido, la investigación aporta herramientas importantes. El muestreo de suelos, tiene como objetivo principal el representar el área total afectada por contaminación mediante la extracción estratégica de porciones de suelo, las cuáles hipotéticamente se comportan como el volumen total.

Ormazabal y Larrañaga (1998), indican que el muestreo de suelos está condicionado por tres factores:

1. Los objetivos de la investigación a realizar

2. La información previa que se dispone sobre el sistema a estudiar

3. El tiempo, el dinero y esfuerzos que pueden dedicarse a la investigación.

De esta forma se pueden establecer al menos dos etapas del muestreo de suelos: el muestreo exploratorio y el muestreo detallado. En el muestreo exploratorio, se recurre a identificar las áreas de entrada del contaminante y a subdividirlas en áreas parciales, donde se tomarán muestras de suelo al azar para posterior análisis y comparación de los datos obtenidos con los valores máximos permisibles de la normatividad. Una vez se obtengan los resultados y efectivamente se establezcan niveles altos de contaminación, se procede a realizar un muestreo detallado del suelo.

En el muestreo detallado, se realiza la toma de muestras de forma horizontal (en el área superficial) y vertical (dentro de los horizontes del perfil de suelo), enfatizando en aquellas zonas que presenten mayores riesgos para la salud humana y el bienestar del ecosistema. La distribución espacial de los puntos de muestreo se realiza según criterio del investigador, pudiendo ser:

a. Al azar

b. Regular

c. Al tresbolillo o alternado

d. En gradiente

En el muestreo al azar las muestras se toman indistintamente en algunos puntos del área afectada. En el muestreo regular es necesario establecer cuadrículas de igual tamaño en forma de subparcelas con el fin de tomar puntos en cada una de ellas. En el muestreo en tresbolillo se trazan diagonales en las subparcelas de manera que los sitios de muestreo representen las puntas de algunas figuras geométricas como el cuadrado (ángulo $\alpha = 45^o$), rectángulo (ángulo $\alpha \neq 45^o$) o hexágono (ángulo $\alpha = 30^o$). El muestreo en gradiente se toma con base a las áreas concéntricas de dispersión del contaminante cuando se tiene ubicado el foco de vertimiento, de tal forma que las muestras se toman en radios. La figura 38, ilustra las formas de distribución espacial de los muestreos en suelos contaminados.

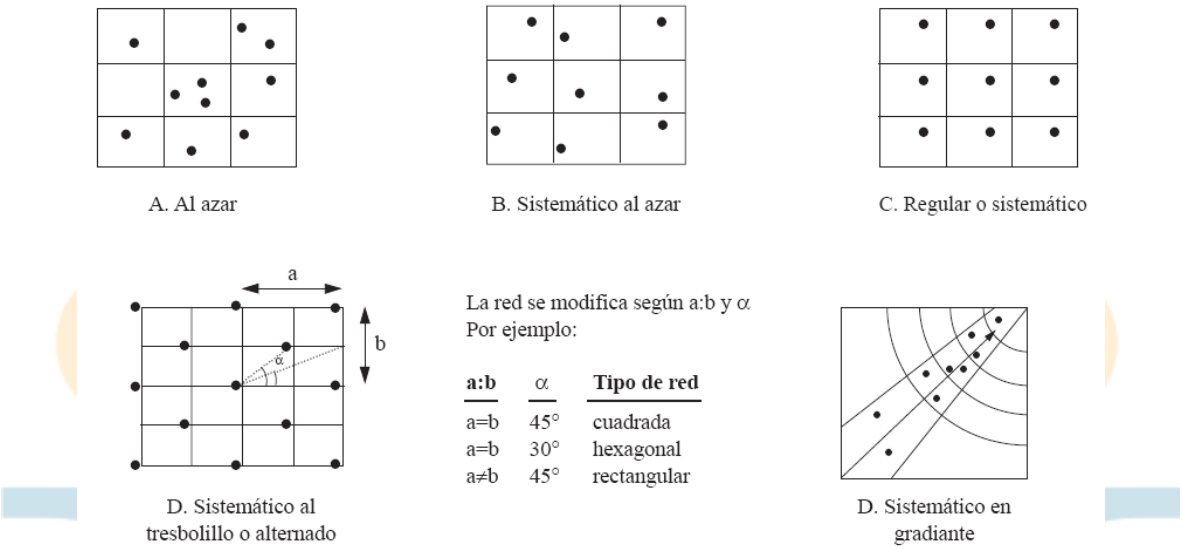

Figura 38. Modelos de distribución espacial de los muestreos de suelo contaminado. Fuente: Ormazabal y Larrañaga (1998)

El número de puntos de muestreo es un factor importante a la hora de tener un mayor acercamiento en la detección de las sustancias contaminantes del suelo. Sin embargo, es difícil establecer con exactitud cuantas muestras se deben tomar para tener menor sesgo, debido a que una hectárea (10.000 m^2) de suelo puede llegar a pesar más de 2.000 toneladas en una sección de 20 cm de profundidad, lo que hace a una muestra de 1 kg de suelo representar tan sólo una fracción equivalente a 5×10^{-7} (cinco diez millonésimas partes) del total.

Algunos estudios de contaminación de suelos, han utilizado métodos probabilísticos para encontrar el número ideal de puntos de muestreo, usando los modelos de distribución espacial mencionados con anterioridad.

La figura 39, ilustra la probabilidad de detectar una sustancia contaminante del suelo, usando modelos probabilísticos entre 50% y 100% de éxito, teniendo como referencia el número de puntos de muestreo y los modelos de distribución de tomas de muestra. Se observa al modelo al azar como el menos acertado ya que la probabilidad de detección de contaminante es la menor para todos los números de puntos de muestreo. El modelo en tresbolillo, se observa como el más adecuado ya que de forma sistémica abarca subáreas de igual magnitud. Para el modelo en tresbolillo se pueden tomar aproximadamente 20 muestras de suelo, pudiendo obtener menos del 10% de sesgo.

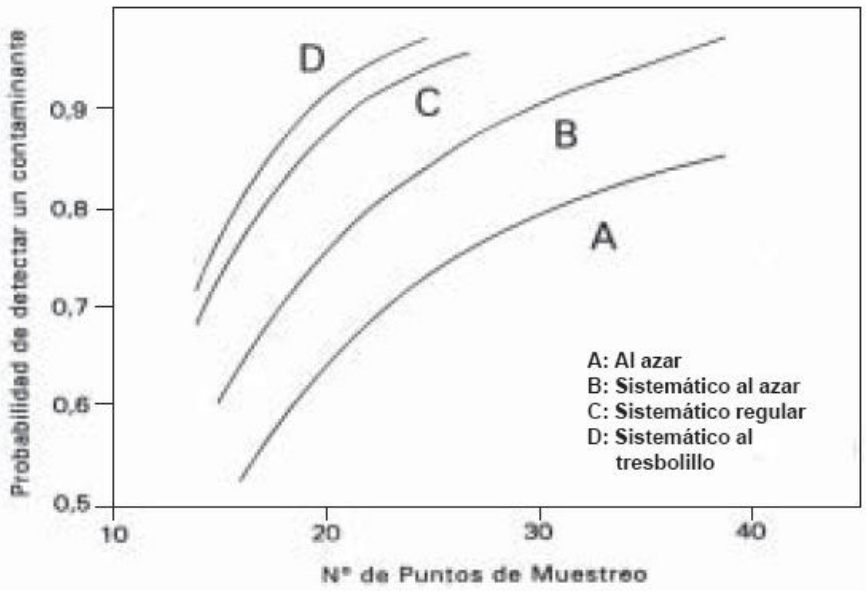

Figura 39. Gráfico de probabilidad de detección de contaminantes con respecto al número de muestras de suelo y al modelo de distribución espacial. Fuente: Ormazabal y Larrañaga (1998)

Los muestreos de profundidad se deben realizar dentro de los primeros 30 cm del perfil del suelo ya que representan el estrato donde ese desarrolla la mayoría de raíces de las plantas. Otra muestra debe ser tomada a una profundidad media entre el manto freático y la superficie, y la última, debe ser tomada inmediatamente antes del manto freático. Este arreglo de muestreo permite delimitar la contaminación del suelo y subsuelo, estando éste último directamente relacionado con el manto freático, el cuál pudiera provocar el transporte del contaminante (Fernández *et al*., 2006). Las muestras de suelo pueden ser tomadas con un palín metálico, y deben ser homogeneizadas.

Una vez se homogeneiza el suelo, se transfiere la muestra a un frasco de vidrio color ámbar con una cubierta de teflón, con el fin de que el contamínate no reaccione con la luz solar (sobre todo hidrocarburos policíclios). Las muestras se deben conservar dentro de una hilera de transporte al laboratorio debidamente marcadas (fecha, sitio, profundidad de muestreo, etc.). Si no van a ser procesadas las muestras, se deben almacenar de inmediato a 4^{o}C hasta la realización del análisis respectivo (Fernández *et al*., 2006).

Conceptos clave:
El muestreo de suelos tiene como objetivo principal el representar el área total afectada por contaminación mediante la extracción estratégica de porciones de suelo, las cuáles hipotéticamente se comportan como el volumen total. La distribución espacial de los puntos de muestreo se realiza según criterio del investigador, pudiendo ser: al azar, regular, al tresbolillo o alternado y en gradiente.

Recursos:

Libro digital:

Ormazabal F.J., Larrañaga E. (1998). Investigación de la contaminación del suelo. Guía metodológica. Estudio histórico y diseño de muestreo. Sociedad pública de gestión ambiental IHOBE. Gobierno Vasco - España. 74p.

Disponible en:
http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/DPGC/File/01.pdf

Lección 23. Monitoreo de suelos.

El monitoreo permanente de los contaminantes del suelo es fundamental, ya que se puede cuantificar su dinámica. El conjunto de muestreos periódicos en los sitios establecidos en la investigación detallada, permitirá obtener datos de referencia para el monitoreo. Algunas variables se consideran claves dentro del monitoreo del suelo y la aguas subterráneas, como lo muestra la figura 40.

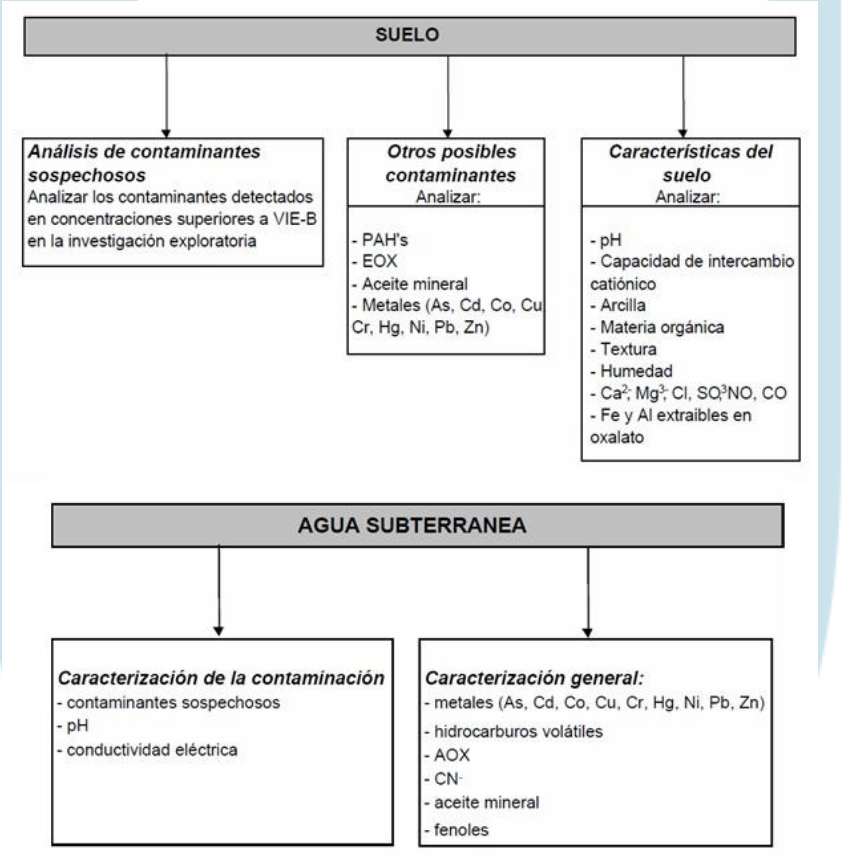

Figura 40. Variables de mayor peso en el monitoreo de suelos y aguas subterráneas contaminadas. La nomenclatura VIE- B corresponde a concentraciones por encima de los límites máximos permisibles de la normatividad. AOX y EOX (compuestos Halogenados orgánicos), PHA´s (Hidrocarburos policíclicos). Fuente: Ezkurra (2008).

Generalmente, en el monitoreo de contaminación, se realizan muestreos del suelo en réplicas tomadas en los mismos sitios con el fin de observar la dinámica en la concentración de los contaminantes y evitar errores por causa de la variabilidad espacial del suelo.

Los objetivos fundamentales del seguimiento a un suelo contaminado, son estimar el tipo y magnitud de la exposición a sustancias nocivas para la salud humana, así como evaluar las interacciones de éstas sustancias con los sistemas ecológicos afectados, como lo muestra el cuadro 24.

Cuadro 24. Análisis de la exposición de contaminantes del suelo en seres humanos y sistemas ecológicos. Fuente: Ezkurra (2008).

Análisis de la exposición para los receptores identificados		
Receptor	**Objetivo**	**Aspectos a considerar**
Salud humana	Estimar el tipo y magnitud de la exposición a los contaminantes tanto en el emplazamiento como en el área de influencia del mismo afectada a través de la dispersión.	*Caracterización del escenario de exposición* - Identificación de las poblaciones expuestas - Caracterización de los condicionantes físicos - Determinación de los usos actuales y futuros e identificación de las actividades asociadas a cada uso y caracterización de sus patrones *Identificación y análisis de las rutas de exposición* - Identificación de las fuentes de contaminación y/o medios afectados - Evaluación del transporte y destino de los contaminantes en los diversos medios - Identificación de los puntos y vías de exposición - Selección de rutas de exposición a evaluar *Estimación de la exposición* - Estimación de la exposición para cada una de las rutas - Combinación de la exposición por diferentes vías - Análisis de la incertidumbre
Ecosistemas	Evaluar la interacción (coexistencia o contacto) del estresor con los componentes ecológicos afectados.	- Caracterización del estresor en relación a su distribución inicial y patrón de variación espacio-temporal - Caracterización del ecosistema en relación a la distribución temporal y espacial de los componentes afectados y de aquellos atributos que influyen en la interacción con el estresor - Elaboración del perfil de exposición

La evaluación de los contaminantes del suelo, puede realizarse mediante técnicas In situ (en el sitio) o Ex situ (fuera del sitio). Las evaluaciones In situ, son generalmente más precisas ya que se estima en tiempo real la concentración y estado químico del contaminante del suelo, sin embargo se requiere el uso de equipos más sofisticados que generalmente son costosos. La evaluación Ex situ, requiere de transportar las muestras de suelo contaminado hacia el laboratorio, pudiéndose

presentar errores de estimación por concepto de reactividad de las sustancias, volatilidad y cambios en los contenidos de humedad de las muestras.

El uso de calicatas en sitios estratégicos de la zona contaminada puede ser de mucha utilidad a la hora de realizar el monitoreo, ya que se puede tener un mejor acercamiento de la movilidad del contaminante en el perfil de suelo. Se recomienda el uso de calicatas de $4m^2$ (2m x 2m) y de 2m de profundidad. La acción de los materiales orgánicos que se concentran en superficie, toma importancia a la hora de monitorear la adsorción de las sustancias contaminantes en la fase coloidal, ya que se pueden generar complejos humus- contaminantes, al igual que arcilla- contaminantes, dependiendo de la reactividad de los compuestos y la presencia de cargas libres en el sistema.

La mayoría de las plantas son susceptibles a la toxicidad de contaminantes, por esta razón, el monitoreo permanente de la cobertura vegetal sirve como variable bioindicadora del efecto nocivo sobre la actividad biótica de los ecosistemas. Se pueden establecer cuadrantes de $1m^2$ lanzados al azar con el fin de identificar la biomasa vegetal presente dentro del cuadrante, así como la diversidad de especies.

Conceptos clave:
El objetivo principal del monitoreo de la contaminación del suelo, es estimar el tipo y magnitud de la exposición a sustancias nocivas para la salud humana, así como evaluar las interacciones de éstas sustancias con los sistemas ecológicos afectados. La evaluación de los contaminantes del suelo, puede realizarse mediante técnicas In situ (en el sitio) o Ex situ (fuera del sitio).

Recursos:

Lectura sugerida:

Guía para el muestreo y análisis de suelo. (2000). Dirección general de asuntos ambientales. Ministerio de Minas y Energía - República del Perú. 21p.

Disponible en:
http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaae/legislacion/guias/guiahidroxvii.pdf

Lección 24. Indicadores de calidad ambiental de suelos.

Como señalamos en lecciones anteriores, la calidad del suelo es una propiedad que emerge de la interacción de una serie de variables físicas, químicas y biológicas. Desde el punto de vista agroambiental, la calidad de un suelo lo definen su salud y fertilidad, vistos con un enfoque productivista y de sanidad de cultivos. El enfoque ecosistémico es más holístico, ya que define la calidad del suelo mediante contenidos aceptables de materia orgánica, ciclaje de nutrientes, biodiversidad y resiliencia (capacidad del suelo de retornar al equilibrio una vez se disturba mediante fuerzas externas).

El cuadro 25, ilustra las principales propiedades indicadoras de calidad ambiental del suelo. Las propiedades físicas y químicas pueden variar en el mediano y largo plazo (meses, años, décadas) y las propiedades biológicas en el corto plazo (días, semanas, meses). Por esta razón, las propiedades biológicas son indicadoras directas del disturbio causado en el suelo por agentes contaminantes.

Cuadro 25. Propiedades indicadoras de calidad ambiental del suelo. Fuente: Cerón y Melgarejo (2005).

Físicas	Químicas	Biológicas
Estabilidad estructural	pH	Biomasa microbiana C
Distribución de poro	Capacidad de intercambio catiónico	Biomasa microbiana N
Capacidad de campo	Materia orgánica	Respiración
Velocidad de infiltración	Nitrógeno mineralizado	Actividades enzimáticas
Textura	Estado de óxido reducción	Organismos indicadores (colémbolos, lombrices, protozoarios, *Rhyzobium*)
Densidad	Conductividad eléctrica	Diversidad: composición y número de especies

La biomasa microbiana (C ó N), indica la cantidad de carbono o nitrógeno que están almacenados en la biomasa microbial del suelo. Este indicador permite estimar la cantidad de vida microbial que alberga un suelo, y es una medida indirecta de la capacidad del suelo de capturar CO_2 y N_2 de la atmósfera. La respiración del suelo, contrario a la biomasa microbial C, indica la cantidad de CO_2 que se emite a la atmósfera, siendo un indicador indirecto de la tasa de mineralización de sustancias orgánicas. En suelos contaminados, el monitoreo de la respirometría permitiría estimar de forma indirecta, la degradación de contaminantes por vía aeróbica.

Las enzimas son proteínas cuyo papel es catalizar las reacciones químicas en los sistemas vivos, actúan sobre sustratos específicos transformándolos en productos necesarios para los ciclos vivos (Cerón y Melgarejo, 2005). Por esta razón, la actividad enzimática es indicadora de la respuesta del suelo a la degradación específica de algunos compuestos contaminantes. Se destacan las deshidrogenasas (indican actividad aeróbica de degradación de hidrocarburos), ureasas (indican la degradación de compuestos nitrogenados orgánicos), fosfatasas (indica la degradación de compuestos fosforados) y sulfatasas (indican la degradación de compuestos azufrados).

La diversidad de organismos del suelo es un indicador biológico importante, ya que permite establecer de manera cualitativa su estado y calidad. Un suelo con bajas poblaciones de organismos y poca biodiversidad (determinada a través de indicadores de Simpson, Shannon, etc.), genera indicios de la presencia de compuestos tóxicos que alteran la red trófica. El estudio de la biodiversidad del suelo es algo complejo, ya que los organismos son altamente móviles lo que dificulta su captura, conteo y clasificación. Sin embargo, existen metodologías estandarizadas que posibilitan reducir los sesgos por estimación, como la técnica de cuantificación de macrobiota por monolitos cúbicos y la del embudo de Berlese.

El cuadro 26, ilustra las actividades de los organismos del suelo y los beneficios en cuanto al ciclaje de nutrientes y estructuración del suelo.

Cuadro 26. Actividades de la microflora y fauna del suelo en el proceso de descomposición y en la estructura del suelo. Fuente: Zerbino y Morón (2003).

Actividades de la microflora y fauna del suelo en el proceso de descomposición y en la estructura del suelo

CATEGORÍA	CICLADO DE NUTRIENTES	ESTRUCTURA DEL SUELO
Microflora Bacterias Hongos	-Catabolizan material orgánica -Mineralizan e inmovilizan nutrientes	-Producen compuestos orgánicos que unen los agregados. -Las hifas unen partículas y agregados
Microfauna Nematodos Protozoarios Ácaros (pequeños)	-Regulan las poblaciones de bacterias y hongos -Intervienen en el reciclado de nutrientes	-Pueden afectar la estructura de los agregados mediante sus interacciones con la microflora
Mesofauna Ácaros Collembolos Artrópodos (pequeños) Enquitraidos (lombrices pequeñas)	-Regulan las poblaciones de hongos y de la microfauna -Intervienen en el reciclado de nutrientes -Fragmentan restos vegetales	-Producen pelotas fecales -Crean bioporos. -Promueven la humificación
Macrofauna Lombrices Enquitraidos (grandes) Bicho bolita Diplopodos Quilopoda Moluscos Insecta (larvas y adultos)	-Fragmentan restos vegetales -Estimulan la actividad microbiana	-Mezclan partículas orgánicas y minerales -Redistribuyen la materia orgánica y los microorganismos -Crean bioporos -Promueven la humificación -Producen pelotas fecales

La presencia de actividades simbióticas en el suelo son buenas indicadoras de su calidad. Un ejemplo de esta asociaciones lo constituyen los HMA (Hongos micorricicos arbusculares) que son reconocidas como simbiosis compatibles e íntimas entre las raíces de las plantas y algunos hongos del suelo (Sánchez de Prager *et al*., 2007). Gracias a la asociación de la planta con HMA se incrementa el volumen de suelo explorado por la raíz, mejorando la eficiencia en la absorción de nutrientes de la solución del suelo, la estructura gracias al poder agregante del micelio externo, y el ciclaje de nutrientes en el sistema. La ausencia de HMA en las raíces de las plantas, indica la presencia de sustancias ajenas al sistema, entre ellas, exceso de nutrientes y de contaminantes.

Conceptos clave:
La calidad del suelo es una propiedad que emerge de la interacción de una serie de variables físicas, químicas y biológicas. Desde el punto de vista agroambiental, la calidad de un suelo lo definen su salud y fertilidad, vistos con un enfoque productivista y de sanidad de cultivos. El enfoque ecosistémico es más holístico, ya que define la calidad del suelo mediante contenidos aceptables de materia orgánica, ciclaje de nutrientes, biodiversidad y resiliencia. Los indicadores biológicos son los más representativos, ya que varían en cortos periodos de tiempo al ser altamente susceptibles al efecto de los contaminantes.

Recursos:

Lectura sugerida:

Cerón L.E., Melgarejo L.M. (2005). Enzimas del suelo: Indicadores de salud y calidad. Artículo publicado en la revista Acta biológica Colombiana, Vol. 10 No. 1: 5-18.

Disponible en:
http://aplicaciones.virtual.unal.edu.co/drupal/files/enzimas.pdf

Lección 25. Niveles de Referencia y niveles de intervención de suelos contaminados.

La estimación de la contaminación del suelo debe partir de la comparación de los valores de concentración del contaminante con algunos niveles de referencia propuestos por normativas y agentes especializados en el tema. Los niveles de referencia, indican alertas sobre riesgos para la salud humana y de los ecosistemas. La EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), ha desarrollado investigaciones tendientes a evaluar los niveles de afectación en la salud humana y el deterioro de los ecosistemas terrestres por causa de exposición a sustancias contaminantes como los plaguicidas, hidrocarburos y metales pesados. Estas investigaciones han servido como insumo para el desarrollo de normativas gubernamentales para la prevención, mitigación y control de la contaminación del suelo. Algunos países en el mundo se destacan por el desarrollo de normas para la identificación de suelos contaminados. Los Estados Unidos de América, Alemania, Francia, Dinamarca, Holanda y España son aventajados en éste tema. El cuadro 27, ilustra algunos valores de referencia de concentraciones críticas de algunos compuestos orgánicos contaminantes, según normativas de algunos países europeos.

Cuadro 27. Niveles críticos de referencia de concentración de contaminantes del suelo. Los valores numéricos se encuentran en unidades de (mg/kg). El atributo NR significa que no hay reportes para dicho contaminante.
Fuente:
http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Estado_Y_Calidad_De_Los_Recursos_Naturales/Suelo/Contaminacion_pdf/Evaluacion.pdf

Compuesto Orgánico	España	Holanda	Dinamarca	Finlandia	Suecia
Clorobenceno	8	30	NR	10	15
Cloruro de Vinilo	0.35	0.1	NR	0.4	NR
Cresoles	7	5	NR	NR	NR
1,1- Dicloroetileno	NR	0.3	NR	NR	NR
1,2- Dicloroetano	4	4	NR	NR	NR
1,4- Diclorobenceno	10	NR	NR	NR	NR
Hexaclorobenceno	65	NR	NR	10	0.05
Pentaclorofenol	3.5	NR	0.01	5	0.1
Piridina	0.1	0.5	NR	20	NR
Tetracloroetileno	3.5	4	5	NR	3
Tetracloruro de carbono	1	NR	NR	NR	NR
Tricloroetileno	9.5	60	5	NR	5

Los niveles de referencia son más estrictos para los suelos cultivados en comparación con los suelos de uso residencial, comercial, institucional o industrial, ya que se generan mayores riesgos para la salud humana por la trazabilidad de algunos compuestos tóxicos que pueden ser absorbidos por las plantas, bioacumularse y ser consumidos en la dieta diaria.

Los metales pesados, son elementos muy estables que en un momento dado son absorbidos por el sistema radical de las plantas cultivadas y llegan al consumidor final. De allí la importancia de establecer niveles máximos permisibles de metales pesados en suelos con riesgo de contaminación. El cuadro 28 Ilustra los niveles de concentración máximos permisibles establecidos por algunos países de la comunidad europea.

Cuadro 28. Niveles máximos permisibles de concentración de metales pesados en suelos agrícolas. Los valores numéricos se expresan en unidades de (mg/kg). EL atributo NR significa que no hay reportes para dicho contaminante. Fuente: Galán y Romero (2008).

Metal	Austria	Canadá	Polonia	Japón	Inglaterra	Alemania
As	50	25	30	15	20	40
Be	10	NR	10	NR	NR	10
Cd	5	8	3	NR	1	2
Co	50	25	50	50	NR	NR
Cr	100	75	100	NR	50	200
Cu	100	100	100	150	50	50
Hg	5	0.3	5	NR	2	10
Mo	10	2	10	NR	NR	NR
Ni	100	100	100	100	30	100
Pb	100	200	100	400	50	500
Zn	300	400	300	250	150	300

Los niveles de intervención de suelos contaminados dependerán en gran medida del grado de afectación por exposición de personas a los contaminantes y de las dosis percibidas. Así, las zonas críticas de intervención serán las mayormente habitadas, como por ejemplo los suelos aledaños a zonas urbanas o semiurbanas y zonas rurales con habitación campestre. Los suelos de zonas forestales de protección, son también sujeto de intervención una vez se identifique la presencia de contaminantes. En Colombia, es común encontrar contaminantes del suelo en zonas de conservación donde se explota ilegalmente la minería. Compuestos como los cianuros, cloruros y metales pesados como el mercurio, plomo y níquel, son los que aparecen con mayor frecuencia, llegando a afectar cauces de agua.

La figura 41, ilustra algunas formas de exposición humana a contaminantes presentes en el suelo. Obsérvese las múltiples formas como una persona puede llegar a tener contacto con sustancias contaminantes.

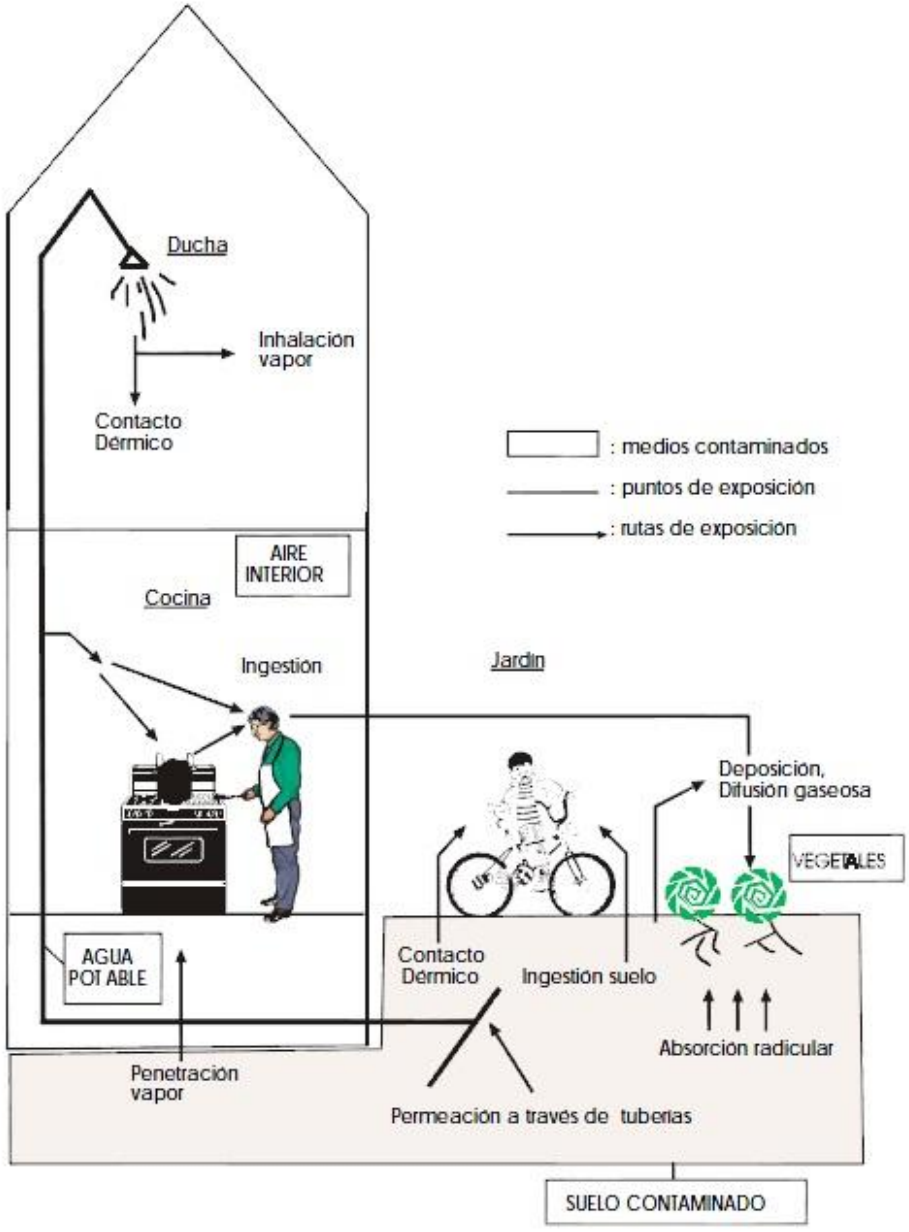

Figura 41. Algunas formas de exposición a contaminantes presentes en el suelo.
Fuente: Ezkurra I. (1998).

Conceptos clave:
Los niveles de intervención de suelos contaminados dependerán en gran medida del grado de afectación por exposición de personas a los contaminantes y de las dosis percibidas. Algunos países en el mundo se destacan por el desarrollo de normas para la identificación de suelos contaminados. Los Estados Unidos de América, Alemania, Francia, Dinamarca, Holanda y España son aventajados en éste tema.

Recursos:

Lectura sugerida:

Galán E. y Romero A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. Artículo publicado en la revista de la sociedad española de mineralogía. No. 10: 48-60.

Disponible en:
http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf

CAPITULO 6. CONTROL Y TRATAMIENTO DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO

Una vez identificado el riesgo por contaminación del suelo, se deben establecer acciones tendientes a mitigar y controlar el impacto ambiental ocasionado sobre los ecosistemas y los seres humanos. Las principales técnicas de tratamiento de la contaminación del suelo son: la contención ó aislamiento, el confinamiento y la descontaminación. La selección de las técnicas a emplear debe tener en cuenta el tipo y grado de afectación de los contaminantes, la eficiencia de remoción y los costos asociados al diseño, instalación y operación de los sistemas. En éste capítulo se abordarán algunos de éstos temas con el propósito de que los participantes del curso reconozcan las principales características de los tratamientos usados a nivel mundial para el tratamiento de la contaminación.

Lección 26. Introducción y conceptos generales sobre el control y tratamiento de la contaminación del suelo.

La solución de problemas de contaminación del suelo, incluye tecnologías diversas que se aplican dependiendo de condiciones específicas en cada caso. El tipo de contaminantes y los recursos disponibles para su tratamiento, son los principales condicionantes. Se pueden diferenciar dos tipos de tratamientos: *In situ* y *ex situ*. Los tratamientos *In situ* se realizan en el lugar donde se presentó el vertimiento de contaminantes, y los *ex situ*, requieren la excavación previa del suelo para su posterior tratamiento bien sea en el mismo lugar o en instalaciones externas, necesitando ser transportados (Ortiz *et al*., 2007).

Según Kaifer *et al*., (2004) las técnicas de tratamiento de suelos contaminados se pueden clasificar en:

- *Técnicas de Contención*: Consiste en el aislamiento del contaminante sin actuar sobre él. Generalmente se emplean barreras físicas contenedoras.

- *Técnicas de confinamiento*: Consisten en reducir la movilidad de los contaminantes en el suelo para evitar su migración actuando directamente sobre las condiciones físico químicas bajo las que se encuentran los contaminantes.

- *Técnicas de descontaminación*: Están dirigidas a disminuir la concentración de contaminantes del suelo.

Las técnicas de descontaminación pueden ser físico químicas, biológicas, térmicas o mixtas. Las técnicas físico químicas buscan alterar la composición física del contaminante (dilución y modificación de carga eléctrica) o transformación molecular, mediante reacciones químicas de oxido reducción. Los tratamientos biológicos potencian los procesos de biotransformación de contaminantes a moléculas como el dióxido de carbono y agua. Las técnicas térmicas buscan volatilizar y trasformar los contaminantes a través del uso de calor. Las técnicas mixtas pueden involucrar la conjugación de las técnicas mencionadas. El cuadro 29, ilustra las principales técnicas de recuperación de suelos y su aplicación en campo.

Cuadro 29. Principales técnicas de recuperación de suelos. Fuente: Ortiz *et al*., (2007).

Tipo de tratamiento		Técnica	Aplicación
Descontaminación	Físico químico	Extracción	In situ
		Lavado	Ex situ
		Flushing	In situ
		Electrocinética	In situ
		Adición de enmiendas	In situ
		Barreras permeables activas	In situ
		Inyección de aire comprimido	In situ
		Pozos de recirculación	In situ
		Oxidación ultravioleta	Ex situ
	Biológico	Biodegradación asistida	In situ
		Biotransformación de metales	In situ
		Fito recuperación	In situ
		Bioventing	In situ
		Landfarming	Ex situ
		Biopilas	Ex situ
		Compostaje	Ex situ
		Lodos biológicos	Ex situ
	Térmico	Incineración	Ex situ
		Desorción térmica	Ex situ
	Mixto	Extracción multifase	In situ
		Atenuación natural	In situ
Contención		Barreras verticales	In situ
		Barreras horizontales	In situ
		Barreras de suelo seco	In situ
		Sellado profundo	In situ
		Barreras hidráulicas	In situ
Confinamiento		Estabilización físico química	Ex situ
		Inyección de solidificantes	In situ
		Vitrificación	Ex situ - in situ

Las técnicas *ex situ* son generalmente más costosas que las *in situ*, debido a inclusión de actividades de excavación y transporte de materiales. La excavación de capas de suelo contaminado para su tratamiento externo, genera la pérdida de la composición del perfil de suelo, modificando algunas de sus propiedades. Cuando los problemas de contaminación de suelo son muy severos (contaminantes altamente tóxicos, por ejemplo sustancias radioactivas o teratogénicas), es usual la extracción y depositación de materiales en zonas apartadas legalmente establecidas para tales fines, siendo prioritario el uso de coberturas impermeables.

Conceptos clave:
La solución de problemas de contaminación del suelo, incluye tecnologías diversas que se aplican dependiendo de condiciones específicas en cada caso. Las técnicas de tratamiento de suelos contaminados se pueden clasificar en: Técnicas de Contención, Técnicas de confinamiento y Técnicas de descontaminación.

Recursos:

Lectura sugerida:

Ortiz I., Sanz J., Dorado M., Villar S. (2007). Capítulo 3 - La recuperación de suelos contaminados. En: Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de vigilancia tecnológica. Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía CITME. Universidad de Alcalá España. Pp 23- 30.

Disponible en:
http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf

Lección 27. Métodos de aislamiento y confinamiento de suelos

Los métodos de aislamiento se emplean para contener los contaminantes del suelo y evitar que éstos puedan ocasionar daños mayores. Las principales técnicas de aislamiento son: Barreras verticales y horizontales, barreras de suelo seco, sellado superficial, sellado profundo y barreras hidráulicas. Ortiz *et al*., (2007) describen cada técnica, así:

***Barreras verticales*:**

Son empleadas *In situ* con el fin de disminuir el movimiento de contaminantes en el perfil de suelo y evitar su llegada a aguas subterráneas. Se utilizan generalmente barreras de cemento y bentonita u hormigón, que garanticen completa impermeabilidad. Estas técnicas se emplean en suelos de texturas gruesas (arenosos) ya que presentan menor esfuerzo de excavación (Thomas y Koerner, 1996).

***Barreras horizontales*:**

Son zanjas horizontales realizadas *In situ*, las cuáles se sellan con materiales impermeables con el fin de evitar la infiltración horizontal y el desplazamiento de contaminantes a lo largo del terreno. Generalmente se utilizan en derrames de contaminantes metálicos (Mulligan *et al*., 2001).

***Barreras de suelo seco*:**

Se basa en la desecación del suelo con el fin de incrementar su poder absorbente de sustancias contaminantes líquidas. De esta forma se impide el transporte de éstas sustancias hacia otros terrenos. Consta de un entramado de pozos verticales y horizontales por los que se hace fluir aire seco hasta la zona problema (Ortiz *et al*., 2007). En la zona superficial se elimina la humedad y se incrementa la presión de vapor, lo que facilita la volatilización de algunos compuestos orgánicos y derivados del petróleo (Aminian y Ameri, 2000).

***Sellado superficial*:**

Con el sellado superficial del suelo se reduce la exposición directa a contaminantes y se incrementa la volatilización de los mismos. Se utilizan materiales como la bentonita o los geotextiles con el fin de cubrir la superficie del suelo. Generalmente se acompaña de barreas verticales u horizontales para evitar derrames. Un inconveniente de la técnica es que genera residuos.

***Sellado profundo*:**

Esta técnica consiste en realizar *In situ* la alteración de la estructura del suelo, con el fin de reducir su permeabilidad, evitando el transporte de contaminantes a horizontes más profundos. Se adicionan materiales plastificantes como los silicatos sódicos o mezclas de bentonitas y resinas orgánicas. Se realizan zanjas verticales profundas de hasta 30m, para inyectar los compuestos sellantes. Esta técnica es utilizada principalmente en suelos de texturas gruesas y de alta permeabilidad (Ortiz *et al*., 2007).

***Barreras hidráulicas*:**

Esta técnica consiste en la extracción de grandes caudales de agua subterránea o superficial, cercanas a la zona de derrame, con el fin de evitar su contaminación. De esta manera se reduce el nivel freático del suelo. Se utilizan pozos y bombas para la extracción del agua, la cuál podrá ser reinyectada al sistema una vez se realice la descontaminación (Kaifer *et al*., 2004).

La figura 42, ilustra algunas de las técnicas de aislamiento mencionadas anteriormente.

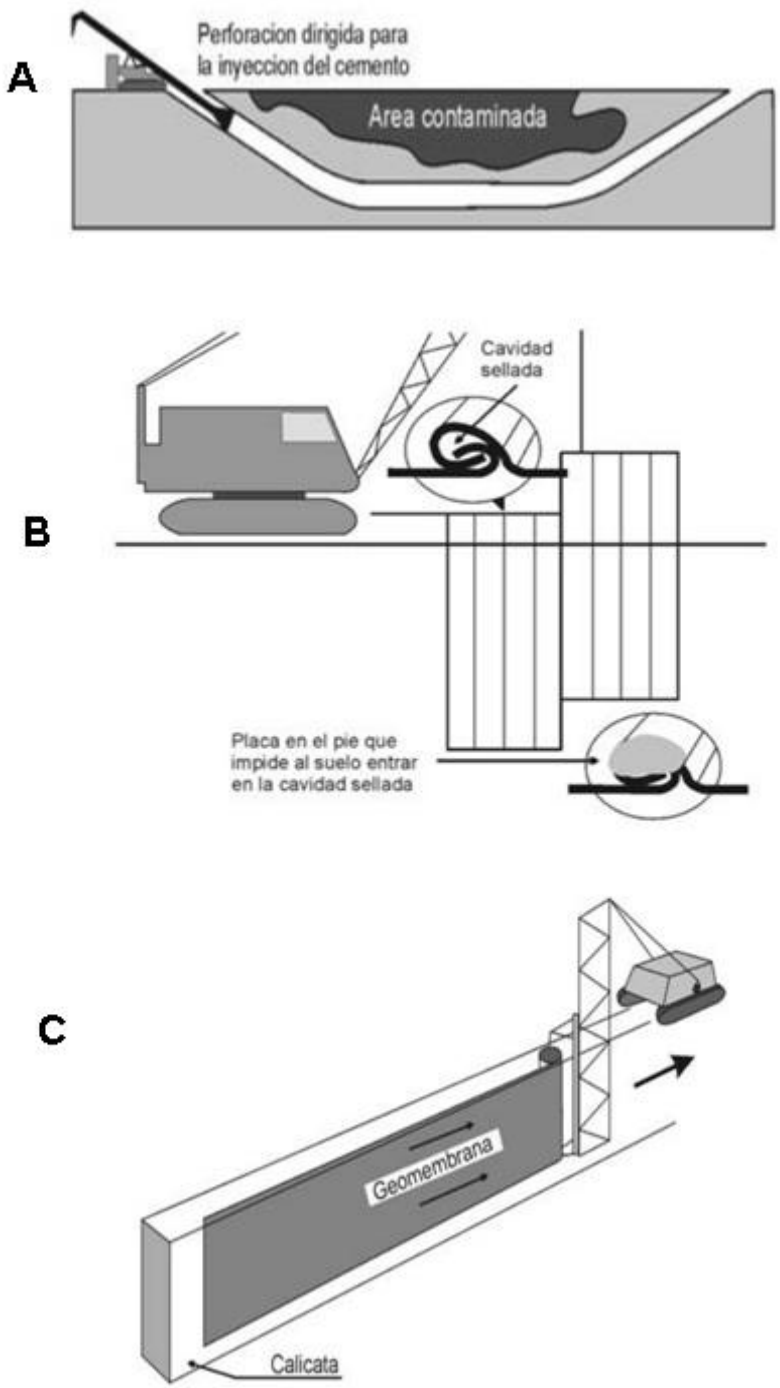

Figura 42. Técnicas de aislamiento de suelos contaminados. (A) Sellado profundo. (B) Barreras verticales de concreto. (C) Geotextiles impermeables.
Fuente: http://www.miliarium.com/prontuario/tratamientosuelos/TecnologiasPantalla.htm

Las técnicas de confinamiento de suelos contaminados reducen la movilidad de contaminantes mediante procesos de estabilización físico química, ya sea convirtiendo los materiales contaminantes en sustancias menos tóxicas o encapsulándolas mediante procesos de solidificación (Suthersan, 1997). Las principales técnicas de confinamiento son: estabilización físico química, inyección de solidificantes y vitrificación.

***Estabilización físico química*:**

Es una técnica de reducción de movilidad de contaminantes realizada *ex situ*, usada para tratamiento de metales pesados, donde a través de procesos químicos se reduce la solubilidad del metal ocasionando menor movilidad en el perfil. Se realiza la extracción del suelo y posteriormente se eliminan las fracciones gruesas en tanques de agua. Luego se realiza la adición de agentes estabilizantes como fosfatos o álcalis que incrementan el pH favoreciendo la precipitación de los metales (Smith *et al*., 1995).

***Inyección de solidificantes*:**

Esta técnica usada para remediación de suelos contaminados con compuestos inorgánicos, cuyo principio es la encapsulación física de los contaminantes en una matriz impermeable. La técnica se realiza *In situ* donde se inyectan mediante pozos agentes estabilizantes inorgánicos como el cemento u otros de tipo orgánico como el polietileno o las parafinas (Khan *et al*., 2004).

***Vitrificación*:**

La vitrificación es una técnica de estabilización térmica de contaminantes del suelo, basada en la adición de calor por electrodos. De ésta forma se puede alcanzar la fusión de las sustancias contaminantes y lograr su inmovilización. Generalmente se usa para el tratamiento de contaminantes inorgánicos como algunos metales pesados y cianuros, alcanzando en algunas ocasiones la destrucción de ellos por reacciones de pirólisis. También puede ser útil para el tratamiento de microorganismos patógenos del suelo (Ortiz *et al*., 2007). La figura 43, ilustra el proceso de vitrificación de suelos contaminados.

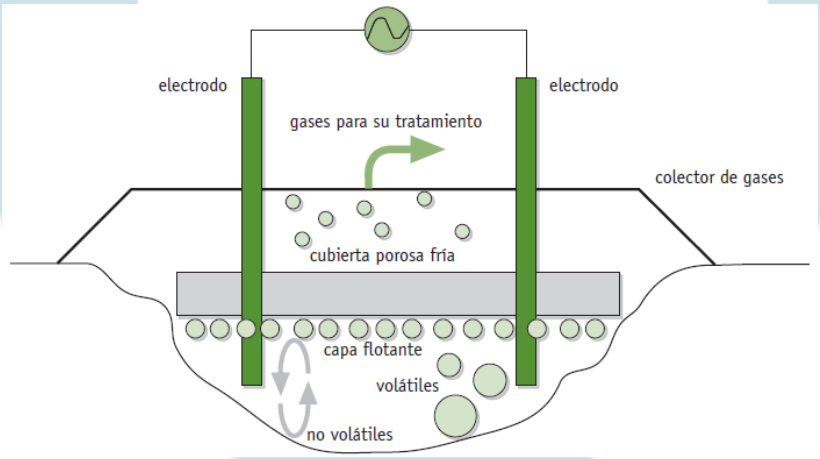

Figura 43. Técnica de confinamiento In situ por vitrificación. Fuente: Ortiz *et al*., (2007).

Conceptos clave:
Las principales técnicas de aislamiento de suelos contaminados son: Barreras verticales y horizontales, barreras de suelo seco, sellado superficial, sellado profundo y barreras hidráulicas. De otro lado, las técnicas de confinamiento de suelos contaminados reducen la movilidad de contaminantes mediante procesos de estabilización físico química, ya sea convirtiendo los materiales contaminantes en sustancias menos tóxicas o encapsulándolas mediante procesos de solidificación (Suthersan, 1997). Las principales técnicas de confinamiento son: estabilización físico química, inyección de solidificantes y vitrificación.

Recursos:

Lectura sugerida:

Ortínez O., Ize I., Gavilán A. (2003). La restauración de suelos contaminados con hidrocarburos en México. Articulo publicado en la revista Gaceta Ecológica. No. 69: 82- 92.

Disponible en:
http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=53906906

Lección 28. Métodos físico químicos.

Los métodos físico químicos de tratamiento de suelos contaminados, engloban las siguientes técnicas: extracción, lavado, Flushing, electrocinética, adición de enmiendas, barreras permeables activas, inyección de aire comprimido, pozos de recirculación y oxidación por luz ultravioleta.

***Extracción*:**

Generalmente son tratamientos *In situ*, que permiten retirar sustancias contaminantes del suelo. Sin embargo, se aplican a la remediación de contaminantes altamente solubles y poco reactivos. La extracción puede ser: de aire (buscando evaporizar compuestos altamente volátiles), de agua (sobre todo en zonas freáticas y aguas subterráneas contaminadas, para posterior su tratamiento externo), de fase libre (para contaminantes presentes entre la superficie y el nivel freático, se usan bombas extractivas), de fases densas (para contaminantes presentes en la parte inferior del nivel freático en zonas poco permeables) y con uso de disolventes (técnica *ex situ*, donde los volúmenes de suelo contaminado se mezclan con disolventes orgánicos como la acetona, hexanol, metanol ó éter con el fin de arrastrar los contaminantes y lixiviarlos o volatilizarlos).

***Lavado*:**

Es un tratamiento *ex situ*, en el que se extrae el suelo y posteriormente es separado por tamaño de partículas usando tamices o sedimentación. El suelo que ha sido separado se lava y luego es retornado a su lugar de origen. La eficacia de la técnica depende del grado de adsorción del contaminante en la fase coloidal, por ello es más difícil realizar lavado a suelos con altos contenidos de arcilla y materiales orgánicos (Reed *et al*., 1996). En el lavado pueden ser usadas sustancias extractantes y agentes quelatantes que dan mayor movilidad a los contaminantes. La figura 44, ilustra de forma general el proceso de lavado.

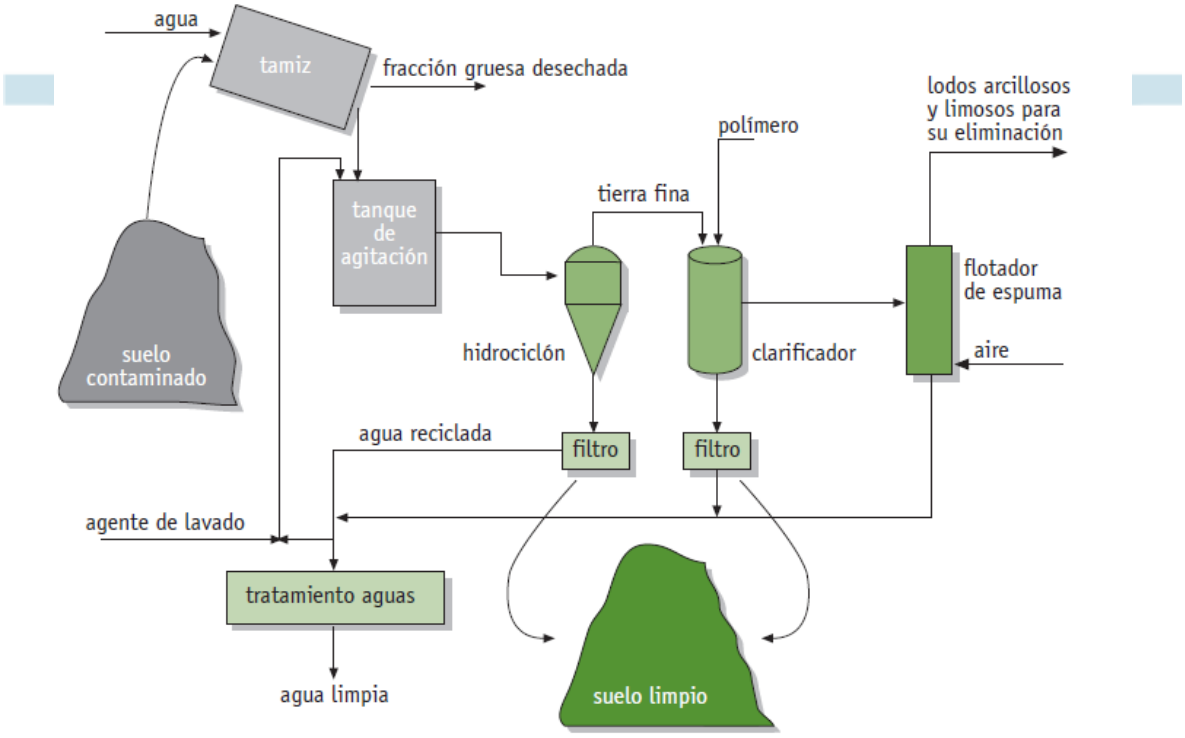

Figura 44. Proceso de lavado de suelos contaminados. Fuente: Ortiz *et al*., (2007).

***Flushing*:**

Es un tratamiento *In situ*, donde el suelo es anegado con agua u otra solución de transporte, que arrastre y movilice los contaminantes hasta otra zona donde puedan ser manejados. Es aplicado en diversidad de contaminantes, especialmente en compuestos orgánicos y se puede complementar con otros tratamientos como el biológico en lagunas alternas (Boulding, 1996). La figura 45, ilustra el proceso de Flushing *In situ*.

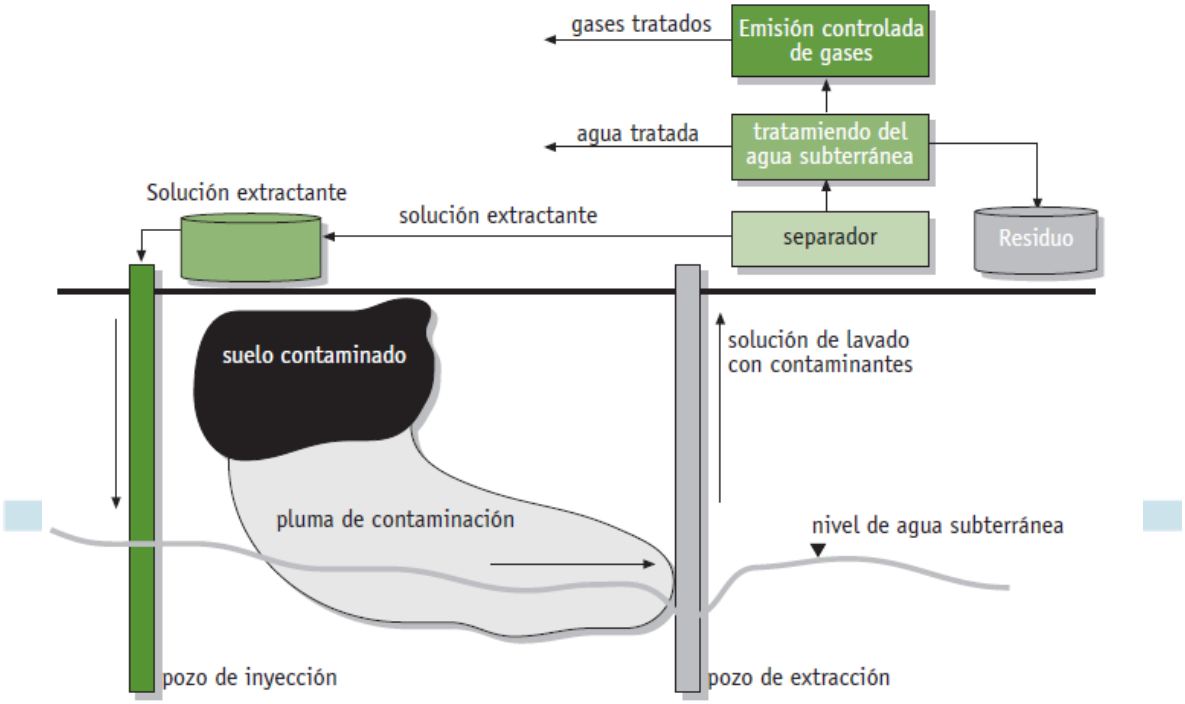

Figura 45. Proceso de Flushing In situ, para tratamiento de suelos contaminados. Fuente: Ortiz *et al*., (2007).

***Electrocinética*:**

Es un tratamiento donde se aplican corrientes eléctricas desde electrodos cargados positivamente (cátodos) y negativamente (ánodos), con el fin de arrastrar agua y contaminantes que contengan cargas eléctricas. De ésta forma se favorece la desorción de los contaminantes en los componentes coloidales del y suelo, siendo una técnica que permite precipitar metales pesados (Pazos *et al*., 2006). La figura 46, ilustra el tratamiento electrocinético de suelos contaminados.

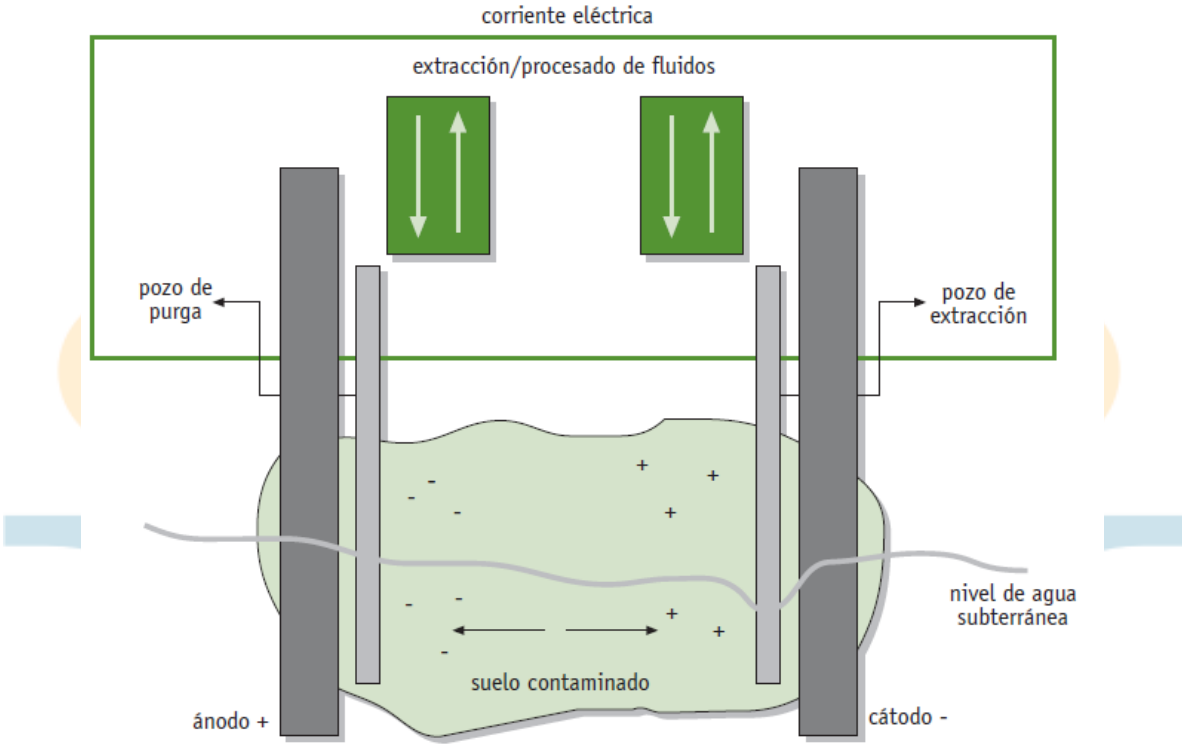

Figura 46. Proceso electrocinético de recuperación de suelos. Fuente: Ortiz *et al*., (2007).

***Adición de enmiendas*:**

Es una técnica usada para remediación de suelos salinos o con presencia de metales pesados, donde son adicionadas sustancias orgánicas e inorgánicas que generan reactividad química. Es común el tratamiento de suelos sódicos con enmiendas cálcicas y materia orgánica. Para el tratamiento de metales pesados son usadas enmiendas como fosfatos, bentonita, hidróxido de calcio, compost o levaduras (Seaman *et al*., 2001).

***Barreras permeables activas*:**

Es una técnica *In situ* que consiste en instalar de forma perpendicular a la pluma de contaminación, pantallas permeables metálicas o de carbono activado, con el fin de que los contaminantes queden adsorbidos, sean precipitados o degradados de manera biótica o abiótica (Kalin, 2004). Algunas barreras están constituidas por mezclas de sustratos y nutrientes, con el fin de incentivar la presencia de microorganismos e incrementar la biodegradación. La figura 47, muestra el proceso de barreas permeables activas.

Figura 47. Barrera permeable activa para eliminar metales tóxicos del agua subterránea. Fuente: Ortiz *et al*., (2007).

***Inyección de aire comprimido*:**

Esta técnica tiene como propósito separar contaminantes disueltos en agua en forma de vapor. Permite incrementar la biodegradación de compuestos contaminantes por acción aeróbica por el incremento en los niveles de oxígeno dentro del sistema (Benner *et al*., 2002). La figura 48, ilustra el tratamiento de contaminantes por inyección de aire comprimido.

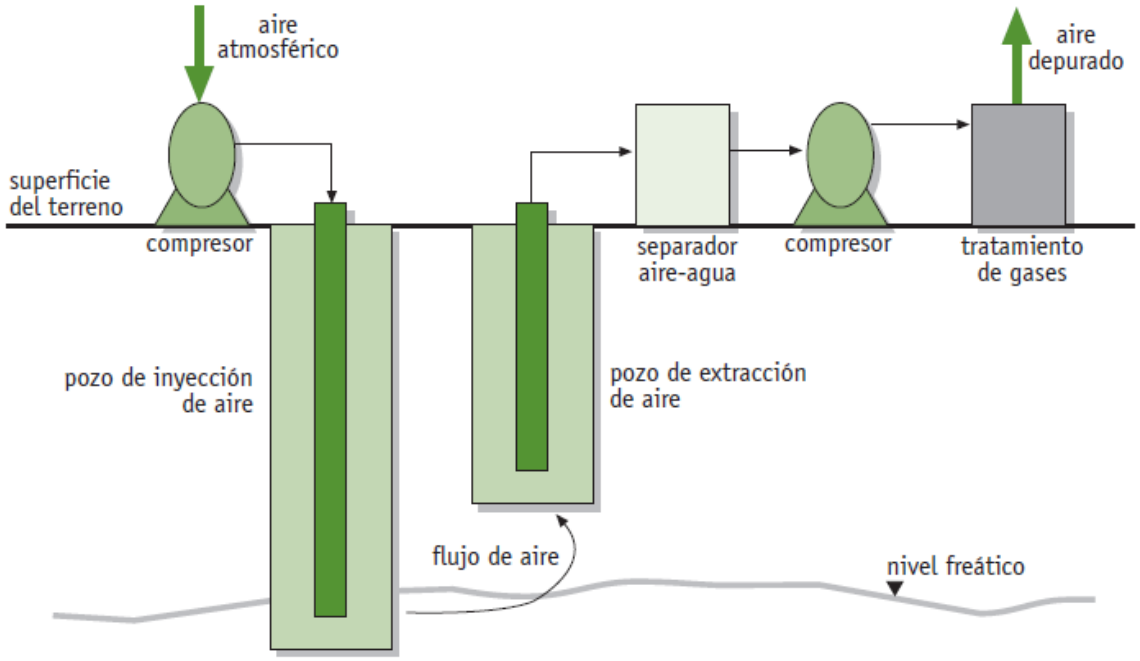

Figura 48. Proceso de inyección de aire comprimido para el tratamiento de contaminantes del suelo. Fuente: Ortiz *et al*., (2007).

***Pozos de recirculación*:**

Esta técnica consiste en la inyección de aire comprimido con el fin de separar los compuestos contaminantes volátiles de las aguas subterráneas. La inyección del aire genera un ascenso de agua hacia la superficie incrementando la eficacia de volatilización de contaminantes por arrastre del aire. Es una técnica adecuada para tratar contaminantes como el tricloroetileno, benceno, tolueno, xileno, etilbenceno y algunos pesticidas. Sin embargo la inyección de aire genera altos consumos energéticos (OSRTI, 2003).

***Oxidación ultravioleta*:**

Es una técnica usada para recuperar aguas subterráneas contaminadas. Se utiliza la adición de compuestos altamente oxidantes como el peróxido de hidrógeno o el ozono, en conjugación con descargas de luz ultravioleta, para destruir compuestos contaminantes. El tratamiento se realiza ex situ en un reactor donde se exponen los contaminantes a los agentes oxidantes y a lámparas de luz ultravioleta. Si se alcanza la mineralización completa se pueden obtener productos finales como el dióxido de carbono, agua y sales. Sin embargo la elevada turbidez de la mezcla interfiere la transmisión de la luz ultravioleta generando bajas eficiencias en el tratamiento (Asante – Duah, 1996). Es usada para tratar hidrocarburos del petróleo, hidrocarburos clorados, alcoholes, cetonas, aldehídos, fenoles, pesticidas y dioxinas (Tiburtius *et al*., 2005).

Conceptos clave:

Los métodos físico químicos de tratamiento de suelos contaminados, engloban las siguientes técnicas: extracción, lavado, Flushing, electrocinética, adición de enmiendas, barreras permeables activas, inyección de aire comprimido, pozos de recirculación y oxidación por luz ultravioleta. La aplicabilidad de cada una de ellas dependerá de las características del suelo, del tipo de contaminante y de los costos asociados.

Recursos:

Lectura sugerida:

García J.M., Rodríguez F., García C., Vereda A., Gómez C. (2007). Aplicación de la técnica de electro descontaminación a un suelo contaminado por Mercurio de la zona de Amadén. Artículo publicado en la Revista Estudios de la zona no saturada del suelo Vol. (7): 89- 94.

Disponible en:
http://www.zonanosaturada.com/publics/ZNS07/area_2/03.pdf

Lección 29. Métodos biológicos.

El tratamiento de suelos contaminados mediante métodos biológicos incluye el uso de técnicas que buscan favorecer el desarrollo de microorganismos y plantas que cumplen papel fundamental en la degradación, transformación o absorción de contaminantes. Ya que el proceso de biodegradación aeróbica es el más eficaz por la formación de productos como el agua y el dióxido de carbono, es muy importante la presencia de oxígeno para el tratamiento de estos contaminantes. Sin embrago, existen otros factores ambientales que son coadyuvantes en los procesos de biodegradación como la temperatura, humedad, salinidad y el pH.

Ortiz *et al*., (2007) señalan que en la actualidad los métodos de recuperación biológicos de suelos contaminados son los mayormente investigados ya que prometen tecnologías más sencillas, económicas y respetuosas con el ambiente que otros tratamientos en los que los contaminantes simplemente son extraídos y transportados a otros lugares. Estos métodos pueden ser In situ o Ex situ.

Tratamientos In situ

Los tratamientos In situ son mucho más baratos que los ex situ, debido a que no requieren de excavación y transporte del suelo contaminado. De otro lado, factores como el ineficiente drenaje, baja porosidad y por consiguiente baja circulación de aire generan cortos circuitos en el sistema lo que ocasiona pérdida en la eficiencia de remoción de la contaminación.

Los procesos metabólicos desarrollados por los microorganismos del suelo, suelen agruparse en tres: fermentación, degradación aeróbica y degradación anaeróbica. En la fermentación de sustancias contaminantes, se pueden generar algunos productos intermedios como el ácido carbónico, cítrico y láctico, así como algunos alcoholes como el etílico, que aunque son prueba de la biotransformación de los compuestos primarios, pueden convertirse en otro problema en el suelo. El proceso de respiración aeróbica requiere de oxígeno como aceptor de electrones para la formación de compuestos como el agua y el CO_2. La respiración anaeróbica usa como aceptores de electrones a compuestos como los nitratos, sulfatos y fosfatos, que donan electrones en el proceso de oxido reducción. A nivel natural, los tres procesos metabólicos son efectuados por organismos como las bacterias y hongos, a favor de la biodegradación de contaminantes. Pero en muchas ocasiones se busca estimular al suelo con la adición de oxígeno, organismos y sustancias coadyuvantes para el incremento de las reacciones dentro del suelo, lo que denominaremos biodegradación asistida.

- **Biodegradación asistida**

En los procesos asistidos es común la adición de microorganismos eficientes (M.E.), aceptores de electrones como el oxígeno, nitratos y sulfatos al suelo con el fin de estimular los procesos biológicos para la degradación y transformación de contaminantes a moléculas más sencillas o menos tóxicas. Bacterias de los géneros Pseudomonas *spp*., Thiobacillus *spp*. y Lactobacillus *spp*.; son los mayormente empleados para incrementar la eficiencia de la degradación. Cuando existe la presencia de sustancias contaminantes solubles y de alta movilidad, se hace necesario emplear

pozos profundos de inyección de éstos estimulantes para evitar la contaminación de mantos acuáticos subterráneos (Bouwer *et al*., 1998). La figura 49 ilustra el proceso de biodegradación asistida.

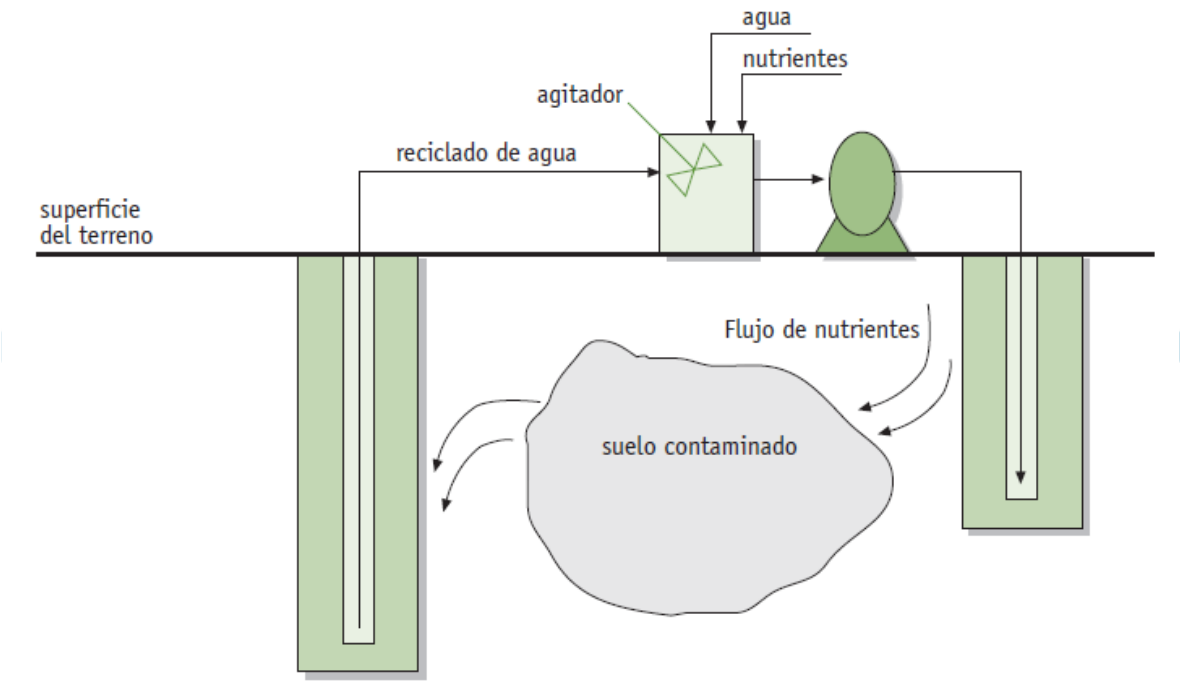

Figura 49. Biodegradación asistida de suelos contaminados. Fuente: Ortiz *et al*., (2007).

- **Fitorremediación**

Según Ortiz *et al*., (2007) la Fitorremediación es una técnica emergente que utiliza la capacidad de ciertas especies vegetales para sobrevivir en ambientes contaminados con metales pesados y sustancias orgánicas y a la vez extraer, acumular, inmovilizar o transformar estos contaminantes del suelo. En este sentido las plantas utilizadas presentan mecanismos adaptativos para tolerar o acumular cierta cantidad de contaminantes en la rizósfera o dentro de sus tejidos.

La técnica consiste en establecer cultivos de especies fitoremediadoras sobre suelos contaminados, permitiendo generar una dinámica biológica de extracción de contaminantes. Plantas del género *Thlaspi spp*., así como *Brassica juncea, Elsholtzia splendens, Hemidesmus indicus, Phragmites Australis*, entre otras son capaces de extraer metales pesados del suelo como el Zn, Pb, As, Cd y Cu (Chen *et al*., 2006 y Wu *et al*., 2006). Sin embargo, algunas de estas plantas son usadas en la remediación de suelos contaminados con herbicidas y pesticidas por efectos directos e indirectos como son el servir de rizohabitad para algunos microorganismos degradadores.

La especie *Eichornia crassipes* de nombre común buchón de agua o jacinto de agua, es una planta semiacuatica que extrae y bioacumula gran cantidad de metales pesados, por ende puede ser usada en zonas fangosas o en suelos anegados contaminados con sustancias tóxicas.

- **Bioventing**

La técnica de Bioventing o bioventilación es una técnica que implica la inyección de oxígeno a través de pozos de aire para estimular la actividad microbiana biodegradadota (Mihopoulos *et al*., 2001). De esta forma se pueden tratar suelos contaminados con sustancias contaminantes como hidrocarburos, pesticidas, herbicidas y compuestos orgánicos volátiles. Se usan grandes caudales de aire u oxígeno puro que son inyectados mediante el uso de compresores, con el fin de generar ambientes que favorezcan la degradación aeróbica. La figura 50 ilustra la técnica de bioventing.

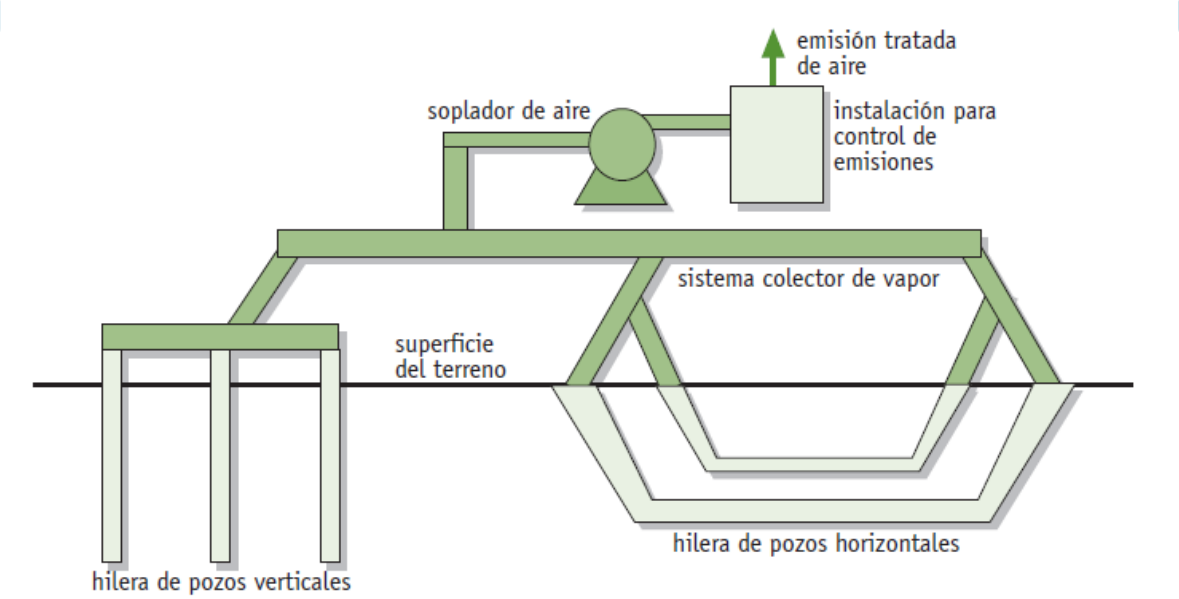

Figura 50. Técnica de bioventing. Fuente: Ortiz *et al*., (2007).

Tratamientos Ex situ

- **Landfarming**

La técnica Landfarming consiste en excavar y extraer la porción de suelo contaminado para posteriormente ser tratado en una zona aledaña con normas de seguridad como el uso de materiales impermeables de base como los geotextiles así como zanjas de drenaje de lixiviados. El suelo es posteriormente volteado con el fin de generar mayor aireación y facilitar la degradación aeróbica. Es común el uso de retroexcavadoras, tractores y palas mecánicas para esta labor. Se adicionan también nutrientes, minerales y agua con el fin de mejorar las condiciones ambientales para el trabajo de los microorganismos (Riser - Roberts, 1998).

- **Biopilas**

La técnica de biopilas es similar al Landfarming, puesto que el suelo contaminado es extraído para ser tratado en zonas aledañas. Sin embargo, la acomodación del suelo se realiza en filas mediante tumultos triangulares que reposan sobre ductos de ventilación que cumplen la función de inyectar oxígeno al sistema, evitando así el volteo mecánico. El tratamiento de esta tecnología biológica es relativamente corto pudiendo ser de semanas a unos pocos meses, siendo usado comúnmente para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos como el petróleo (Plaza *et al*., 2005).

- **Compostaje**

El compostaje es un proceso bioxidativo usado para el tratamiento de suelos contaminados con compuestos tóxicos de origen orgánico. En este proceso se busca mejorar la eficiencia de transformación microbiana a través del manejo de algunas variables ambientales como el contenido de humedad, el pH y la temperatura. Generalmente se extrae la porción de suelo contaminado y se dispone en pilas que son cubiertas con materiales impermeables como el plástico de color negro. El suelo es frecuentemente volteado para dar aireación y regular la temperatura dentro de la compostera. Es posible la adición de compuestos energéticos como la melaza para activar los microorganismos y elevar sus poblaciones. Durante las tres primeras semanas se presenta una fase termófila donde la compostera puede alcanzar los 70^0C pudiendo eliminar otros agentes patógenos como las coliformes fecales y la *Salmonella spp*.

- **Lodos biológicos**

El tratamiento de suelos contaminados mediante lodos biológicos, es altamente costoso debido a que es necesario realizar una fase de tamizado de las partículas con el fin de dar prioridad a los materiales de suelo más finos, así como el uso de energía para la mezcla de los materiales y el incremento de la aireación. Los materiales finos son transportados hasta unos reactores donde se adicionan microorganismos eficientes para la degradación. Los reactores se usan para la agitación o mezcla del suelo y el control de las variables ambientales anteriormente descritas. Una de las ventajas de este tratamiento es que pueden darse otras reacciones como la adsorción/ desorción, disolución/ precipitación, intercambio iónico, complejación, quelatación, volatilización y oxido reducción de contaminantes (Christodoulatos y Koutsospyros, 1998). La figura 51 ilustra el proceso de lodos biológicos.

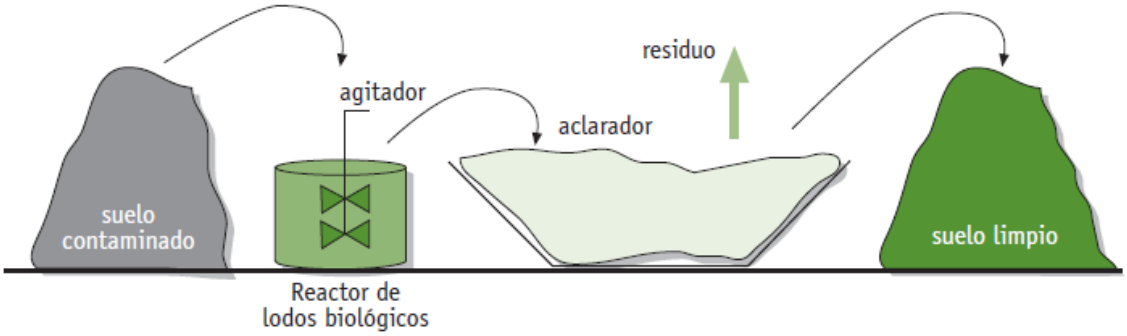

Figura 51. Tratamiento de suelos contaminados mediante lodos biológicos. Fuente: Ortiz *et al*., (2007).

Conceptos clave:
El tratamiento de suelos contaminados mediante métodos biológicos incluye el uso de técnicas que buscan favorecer el desarrollo de microorganismos y plantas que cumplen papel fundamental en la degradación, transformación o absorción de contaminantes. Ya que el proceso de biodegradación aeróbica es el más eficaz por la formación de productos como el agua y el dióxido de carbono, es muy importante la presencia de oxígeno para el tratamiento de estos contaminantes.

Recursos:

Lectura sugerida:

Adams R., Domínguez V. y García L. (1999). Potencial de la biorremediación de suelo y agua impactados por petróleo en el trópico mexicano. Artículo publicado en la revista Terra Latinoamericana Vol. 17(2): 159- 174.

Disponible en:
http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57317209

Lección 30. Normatividad Ambiental.

La normatividad ambiental proferida a nivel mundial con respecto a la protección del recurso suelo, es relativamente nueva. Hasta los años 1970 sólo se hablaba de la contaminación del aire y del agua, y al suelo se le atribuía una capacidad de autodepuración casi infinita (Silva y Correa, 2009). En 1972, seguida del desarrollo de estudios de investigación entorno a la susceptibilidad de algunos suelos de degradación, se emite en Europa la declaración llamada “Carta europea de suelos”, que define al suelo como uno de los más preciados activos de la humanidad, sobre el que viven

hombres, animales y plantas; calificándolo como fácilmente destruible, por ende la necesidad urgente de generar acciones tendientes a su conservación (Solano, 2005).

Posteriormente, en la cumbre de Río de Janeiro (1992), se reconoce la importancia de la protección del suelo con miras a alcanzar un verdadero desarrollo sostenible, haciendo énfasis en la prevención y control de acciones antrópicas que generan procesos de contaminación y degradación. En el mismo año, se desarrollaron dos convenios muy importantes: el de diversidad biológica y el de cambio climático, los cuáles reconocieron aspectos fundamentales como la estrecha relación que existe entre el recurso suelo y los ecosistemas estratégicos que albergan la diversidad continental, así como la importancia del mantenimiento de la materia orgánica del suelo para la captura de carbono desde la atmósfera.

En 1994 tras la convención de las Naciones Unidas por la lucha contra la desertificación, se generaron medidas tendientes a evitar y reducir la degradación del suelo, rehabilitar terrenos parcialmente degradados y recuperar tierras desertificadas; ya que estos aspectos ambientales tienen una estrecha relación con la pobreza, la inseguridad alimentaria, la pérdida de la diversidad biológica y el cambo climático (Silva y Correa, 2009). En el año 1997, se desarrolló en Japón el Protocolo de Kioto que promovió el desarrollo sostenible e invitó a todas las naciones a reducir las emisiones atmosféricas, cuidar los suelos y evitar la deforestación de los bosques.

A inicios del siglo XXI, en (2001) la Comisión de comunidades europeas advirtió que la erosión del suelo y el declive de su fertilidad, representan una amenaza de primer orden para el desarrollo sostenible ya que reducen la viabilidad de las tierras agrícolas (CCE, 2002). A partir de estos pronunciamientos, se han venido desarrollando en distintos países del mundo normativas gubernamentales tendientes a prevenir, mitigar y controlar los impactos ambientales sobre el recurso suelo y los contaminantes que puedan afectarle. Países como España, Suecia, Bélgica, Eslovenia, Hungría, Alemania, Francia, Japón e Italia, son abanderados en éste aspecto. El uso excesivo de plaguicidas, es uno de los temas que más preocupa a nivel mundial, por ello el desarrollo de tratados internacionales tendientes a regular su manejo, como se ilustra en el cuadro 30.

La EPA (Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos) a partir de resultados de investigación, ha emitido diversas normativas donde se establecen los limites máximos permisibles de concentración de contaminantes en el suelo, con el fin de que se tengan en cuenta a la hora de diagnosticar, mitigar y controlar los impactos causados, así como sancionar a los responsables. Otras cumbres como la de Johannesburgo (2002) sobre diversidad biológica y Copenhagen (2009) sobre cambio climático, refuerzan la idea de la conservación del suelo con miras a alcanzar el verdadero desarrollo sostenible.

Cuadro 30. Principales tratados internacionales en el marco del manejo de plaguicidas. Fuente: FARN (2005).

Referencia	Objetivo/síntesis
Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación (1991).	El objetivo del convenio es reducir el movimiento transfronterizo de residuos para tratar y disponer éstos de una manera adecuada y cercana a su fuente de generación y minimizar la cantidad de residuos que se generan. Establece un procedimiento de notificación previa de todo movimiento transfronterizo de residuos.
Convenio de Rotterdam sobre el procedimiento de consentimiento fundamentado previo, aplicable a ciertos plaguicidas y productos químicos peligrosos objeto de comercio internacional (2000).	El objetivo del convenio es promover la responsabilidad compartida y los esfuerzos conjuntos de las partes, en la esfera del comercio internacional de ciertos productos químicos peligrosos, a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente frente a posibles daños y contribuir a su utilización ambientalmente racional, facilitando el intercambio de información acerca de sus características, estableciendo un proceso racional de adopción de decisiones sobre su importación y exportación y difundiendo esas decisiones a las partes. El convenio se aplica a los productos químicos prohibidos o rigurosamente restringidos y a las formulaciones plaguicidas extremadamente peligrosas.
Convenio de Estocolmo sobre reducción y eliminación de contaminantes orgánicos persistentes (COPs) (2005).	El objetivo del convenio es proteger la salud humana y el medio ambiente frente a los contaminantes orgánicos persistentes. Establece medidas para reducir o eliminar las liberaciones derivadas de la producción y utilización intencionales y no intencionales, y las derivadas de existencias y desechos.
Convenio de Viena para la protección de la capa de ozono (1989)	Las partes tomarán las medidas apropiadas para proteger la salud humana y el medio ambiente contra los efectos adversos resultantes o que puedan resultar de las actividades humanas que modifiquen o pueda modificar la capa de ozono.
Protocolo de Montreal (1990)	Establece acciones a cumplir por los Estados a fin de disminuir las sustancias agotadoras de la capa de ozono, reconvirtiendo sectores industriales que las utilizan en sus procesos productivos.
Convenio sobre la seguridad y la salud en la agricultura (2003)	Dicta disposiciones generales para el empleador y el trabajador con el fin de lograr una máxima condición de seguridad para las partes.
Convención sobre diversidad biológica (1994)	El objetivo de esta convención internacional se centra en la conservación de la biodiversidad, la utilización sostenible de sus componentes y la participación equitativa y justa de los Estados en los beneficios derivados del uso de los recursos genéticos.
Convención sobre lucha contra la desertificación (1996)	El objetivo es luchar contra la desertificación y mitigar los efectos de la sequía, por medio de la aplicación de estrategias integradas a largo plazo que se centren simultáneamente en el aumento de la productividad de las tierras, la rehabilitación, conservación y el aprovechamiento sostenible de los recursos tierra e hídricos, con el fin de mejorar las condiciones de vida, especialmente a nivel comunitario.

Normatividad ambiental en Colombia

En Colombia, la normativa ambiental enfocada hacia la protección y adecuado uso del suelo es relativamente nueva. Los inicios de la normativa ambiental colombiana en éste tema se dan con la aparición de la Ley 2 de 1959 por la cuál se establecen las zonas forestales protectoras y bosques de interés general, para el desarrollo de la economía forestal y la protección de los suelos. El cuadro 31 ilustra de forma cronológica la normatividad ambiental colombiana en torno a la protección del suelo y la regulación de sustancias químicas peligrosas.

Cuadro 31. Normatividad ambiental colombiana en torno a la protección del suelo y la regulación de sustancias químicas peligrosas. Fuente: El autor.

Normativa	Descripción
Ley 2 de 1959	Establecimiento de zonas forestales protectoras y bosques de interés general, para el desarrollo de la economía forestal y la protección de los suelos.
Ley 23 de 1973	Establecimiento de lineamentos para prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y buscar mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales Renovables, con el fin de mejorar la salud y el bienestar de todos los habitantes del territorio Nacional.
Decreto 2811 de 1974	Código de los recursos naturales. Estableció la importancia de la conservación de los ecosistemas naturales y el suelo, así como el establecimiento de requisitos y condiciones para la importación, fabricación, transporte, comercialización, manejo y disposición de sustancias peligrosas.
Ley 9 de 1979	Código sanitario nacional. Desarrolla múltiples temas entre los cuáles se destacan los residuos sólidos, emisiones atmosféricas, sustancias químicas peligrosas, sustancias tóxicas, plaguicidas, etc.
Decreto 2655 de 1988	Código de minas. Establece algunas restricciones de la actividad minera sobre todo en zonas de reserva natural, asentamientos humanos y zonas de producción hídrica; con el fin de prevenir los riesgos a la salud y la contaminación de los suelos y el agua.
Decreto 1843 de 1991	Reglamenta el uso y adecuado manejo de plaguicidas a nivel nacional, incluyendo aproximaciones sobre parámetros técnicos y niveles de toxicidad.
Constitución Política de 1991	Definición del Estado social de Derecho y establecimiento de varios artículos tendientes a velar por la protección del ambiente y las personas.
Ley 99 de 1993	Sistema Nacional Ambiental). Se establecen regulaciones ambientales en torno a actividades agropecuarias como el uso de agroquímicos, especialmente lo referente a la importación, distribución, producción y comercialización de pesticidas, acogiéndose a convenios internacionales, como la decisión andina 436 del acuerdo de Cartagena y sus normas reglamentarias.
Ley 388 de 1997	Particulariza la restricción al uso del suelo respecto de la urbanización, dentro de los Planes de Ordenamiento territorial (POT), y precisa que las zonas de expansión urbana o rural pueden tener una limitación por aspectos paisajísticos, geográficos o ambientales.

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos encaminados hacia la regulación de la degradación del suelo, se continúan presentando episodios lamentables para nuestro país como los deslizamientos y aludes de tierra en temporadas invernales que llegan a alcanzar pérdidas humanas, crecientes de ríos y arrastre de sedimentos desde las zonas altas de las cuencas que han sido deforestadas y mal manejadas, inundaciones en zonas bajas por colmatación de cauces de ríos y poca regulación de caudales, contaminación de suelos y acuíferos por el uso de sustancias tóxicas en minas ilegales, derrame de hidrocarburos en zonas de extracción y transporte de petróleo, entre otros. Estos aspectos deben ser mejorados poco a poco, iniciando por el trabajo con las comunidades en torno a mejorar la conciencia ambiental y a recalcar la importancia del cuidado de los recursos naturales

para el desarrollo de la nación, donde deben jugar un papel muy importante los ingenieros ambientales que actúan dentro del tejido social de nuestro país.

Conceptos clave:
La normatividad ambiental proferida a nivel mundial con respecto a la protección del recurso suelo, es relativamente nueva. Hasta los años 1970 sólo se hablaba de la contaminación del aire y del agua, y al suelo se le atribuía una capacidad de autodepuración casi infinita (Silva y Correa, 2009). En Colombia con la creación del SINA (Sistema Nacional Ambiental) mediante la ley 99 de 1993, se han venido consolidando procesos normativos en torno a la contaminación del suelo y a la regulación de sustancias tóxicas.

Recursos:

Lectura sugerida:

Silva S.M., Correa F.J. (2009). Análisis de La contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. Artículo publicado en la revista Semestre Económico, Volumen 12, No. 23: 13- 34.

Disponible en:
http://redalyc.uaemex.mx/pdf/1650/165013122001.pdf

Libros digitales:

CCE. (2002). Comisión de las Comunidades Europeas. Hacia una estrategia temática para la protección del suelo. [En línea] Comunicación de la comisión al consejo, el Parlamento Europeo, el comité económico y social y el comité de las regiones. Bruselas.

Disponible en:
http://www.oei.es/salactsi/ue.htm

FARN. (2005). Fundación Ambiente y Recursos Naturales. Marco legal aplicable al manejo de pesticidas. [En línea] Banco mundial, Argentina.

Disponible en:
http://www.farn.org.ar/arch/informe_pesticidas1.pdf

Multimedia:

Video:
Aspectos técnicos sobre la Nueva Ley de Residuos y Suelos contaminados. España 2011.

Disponible en:
http://www.youtube.com/watch?v=walR-hSS7DE

Resumen:

En el video se muestran imágenes del desarrollo legislativo por el parlamento Español, de normas para el manejo de los residuos y suelos contaminados. Se ilustran algunos aspectos técnicos acerca de la peligrosidad de los agentes contaminantes y la conveniencia del desarrollo de regulaciones legales para la protección de la salud de la población.

BIBLIOGRAFÍA

AEMA (Agencia Europea de Medio Ambiente) – PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (2002). Con los pies en la tierra: La degradación del suelo y el desarrollo sostenible en Europa: Un desafío para el siglo XXI. Problemas ambientales No. 16, 34p.

Aldana A. (2005). Modulo Edafología y fertilidad. Primera edición. Universidad Nacional abierta y a distancia UNAD. 200p.

Aminian, K., y Ameri, S. (2000). Evaluation of the petroleum technology-based dry soil barrier. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 26 (1-4): 83-89.

Asante- Duah, D. K. (1996). Managing Contaminated Sites: Problem Diagnosis and Development of Site Restoration. Wiley, New York, NY.

Benner, M. L., Mohtar, R. H., y Lee, L. S. (2002). Factors affecting air sparging remediation systems using field data and numerical simulations. *Journal of Hazardous Materials*, 95 (3): 305-329.

Bohn H., Mc Neal B. y O'connor G. (2001). Química del Suelo. Tercera edición. Editorial Jhon Wiley & Sons INC. 322 p.

Boulding, J. R. (1996). USEPA Environmental Engineering Sourcebook. Ann Arbor Press. Chelsea, MI.

Bower E. J., Durant N.D., Wilson L.P. y Zhang W. 1998. Consideraciones de diseño en los procesos de remediación In situ de contaminantes. Publicado en: Tratamiento biológico de residuos peligrosos. John Wiley y Sons editorial. New York. pp 237 – 269.

Chen Y. X., Wang Y.P., Wu W. X., Lin Q., y Xue S. G. 2006. Impactos de la quelatación asistida por fitorremediación en comunidades microbianas presentes en la rizosfera de un suelo acumulador y no acumulador de cobre. Publicado en la revista The science of the total environment No. 356 (1-3): 247 – 255.

Contreras C. (2006). Manejo integral de Aspectos ambientales. Diplomado en gestión ambiental empresarial para funcionarios de ETB. Pontificia Universidad Javeriana.

Christodoulatos C, y Koutsospyros A. 1998. Bioslurry reactors. In Lewandowski G. A., and De Filippi L. J., (Eds.), Biological Treatment of Hazardous Wastes. John Wiley and Sons, Inc. New York. pp. 69- 101.

Espinel, S. (1991). Apuntes ecológicos. Editorial Lealon. Medellín. 152 p.

Ezkurra I. (1998). Investigación de la contaminación del suelo. Manual práctico. Sociedad pública de gestión ambiental IHOBE. Gobierno Vasco. 102p.

Fassbender H. W. (1982). Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. San José de Costa Rica. 398p.

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FEDERACAFÉ). (1975). Manual de conservación de suelos de ladera. Cenicafé. Chinchiná. 267 p.

Fernández L.C., Linares N., Rojas A., Roldán T-G., Ramírez M.E., Zegarra H.G., Hernández R., Reyes R.J., Flores D., Arce J.M. (2006). Manual de técnicas de análisis de suelos aplicados a la remediación de sitios contaminados. Instituto Mexicano del Petróleo. Secretaría de Medio Ambiente y recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología. México D.F. 184p.

Field J. (2003). Biodegradación de Contaminantes orgánicos peligrosos. Universidad de Arizona. Dpto de Ingeniería y química ambiental. 434p.

Galán E. (2003). Contaminación de suelos por compuestos orgánicos. Informe final. Consejería del medio ambiente de la junta de Andalucía España. 31p.

Gómez M., Ramírez R. J. (2007). Fuentes de contaminación de aguas subterráneas en la heroica ciudad de Huajuapan de León, Oaxaca México. Articulo publicado en la revista de Temas de Ciencia y Tecnología Vol. 11, No. 33, pp 23-28.

Holdridge, L. R. (1979). Ecología basada en zonas de vida. IICA. San José. 216 p.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC y Corporación Autónoma regional del Valle del Cauca CVC. (2004). Levantamiento de suelos y zonificación de tierras del Departamento del valle del Cauca. Tomo 2. 775 p.

IDEAM. 2001. Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales. Segunda comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático. Capitulo Uno Circunstancias nacionales. 44p.

Jaramillo D. (2002). Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. pp.619.

Jenny, H. (1940). Factors of soil formation. A system of quantitative pedology Mc Graw Hill. New York, 281p.

Kaifer, M. J., Aguilar, A., Arana, A., Balseiro, C., Torá, I., Caleya, J. M. y Pijls, C. (2004). Guía de Tecnologías de Recuperación de Suelos Contaminados. Comunidad de Madrid, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Madrid. 175 p.

Kalin, R. M. (2004). Engineered passive bioreactive barriers: risk-managing the legacy of industrial soil and groundwater pollution. *Current Opinion in Microbiology*, 7: 227-238.

Kaurichev I. S. (1984). Prácticas de edafología. Primera edición en español. Editorial Mir. Moscú. 280p.

Khan, F. I, Husain, T., and Hejazi, R. (2004). An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management,* 71: 95–122.

Labrador J. (1996). La materia orgánica en los Agrosistemas. 2 da edición. Ministerio de agricultura, pesca y alimentación de España. 293p.

Lloyd J.R y Macaskie L.E. (2000). Bioremediation of Radionuclide – Containing Wastewaters. In: Lovely D.R. (Ed), Environmental Microbe – Metal Interactions. American Society of Microbiology Washington, pp. 227 – 327.

Malagón D. (2003). Ensayo sobre tipología de suelos colombianos - énfasis en génesis y aspectos ambientales. Publicado en Revista académica Colombiana de la Ciencia, Volumen 27, No. 104: 319-341.

Martínez M.J., Pérez C., Tudela M., Molina J., Linares P., Navarro C., Vidal J., Barberán R., Mantilla W., Tovar P., Solano A., Marimón J., Agudo I., Hernández C. (2005). Desertificación: monitorización mediante indicadores de degradación química. Proyecto Desemet. Acción piloto Región de Murcia, Ed. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente. 107p.

Mulligan, C. N., Yong, R. N., and Gibbs, B. F. (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering Geology*, 60: 193-207.

Mihopoulos P. G., Cuidan M. T, y Sayles G. D. 2001. Complete remediation of PCE contaminated unsaturated soil by sequential anaerobic bioventing. In Water Science and Technology, No. 43 (5): 365 – 372.

Navarro S. y Navarro G. (2000). Química Agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Ediciones Mundi prensa. Madrid España. 488 p.

Orrego X., Arumi J. (2005). Transporte de agua y soluto en zona no saturada. Publicado en La revista Ciencia- Ahora No. 15, marzo – abril. 6p.

Ortiz I., Sanz J., Dorado M., Villar S. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. Informe de vigilancia tecnológica. Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía CITME. Universidad de Alcalá España. 109p.

OSRTI. (2003). Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report (10th Edition). EPA 542-R-01-004.

Pazos, M., Sanromán, M. A., y Cameselle, C. (2006). Improvement in electrokinetic remediation of heavy metal spiked kaolin with the polarity Exchange technique. *Chemosphere*, 62 (5): 817-822.

Plant J.A. y Raiswell. R. (1983). Principles of environmental chemistry. En: Thornton I (ed). Applied Enviromental Geochemistry. Pp 1-39. Academic Press. Lóndres.

Plaza G., Ulfig K., Worsztynomicz A., Malina G., Krzeminska B. y Brigmon R. L. 2005. Respirometry for assessing the biodegradation of petroleum hydrocarbons. In Environmental Technology, No. 26 (2): 161- 169.

Posada S. (2010). Modulo: Manejo y Conservación de suelos – primera parte. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. 64p.

Reed, B. E., Carriere, P. C., and Moore, R. (1996). Flushing of a Pb (II) contaminated soil using HCl, EDTA, and CaCl2. *Journal of Environmental Engineering*, 122 (1): 48-50.

Rivera H. (2005). Prevención y control de problemas de erosión severa para zonas de ladera tropicales. Centro para la investigación en sistemas sostenibles de producción agropecuaria (CIPAV). 65p.

Riser - Roberts E. 1998. Remediation of petroleum contaminated soil: biological, physical and chemical process. Lewis Publishers, Boca Ratón, Fl.

Sabroso M.C., Pastor A. (2004). Guía sobre suelos contaminados. Confederación de pequeña y mediana empresa Aragonesa. Aragón España. 109p.

Sánchez de Prager M. (2007). Las endomicorrizas: Expresión bioedáfica de importancia en el trópico. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. 351 p.

Seaman, J. C, Arey, J. S., and Bertsch, P. M. (2001). Immobilization of nickel and other metals in contaminated sediments by hydroxyapatite addition. *Journal of Environmental Quality*, 30: 460-469.

Silva S.M., Correa F.J. (2009). Análisis de La contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. Artículo publicado en la revista Semestre Económico, Volumen 12, No. 23: 13- 34.

Soil Survey Division Staff (1993). Soil survey manual. Handbook No. 18. United states Department of Agriculture (USDA). Washington D.C. 437p.

Soil survey staff. (1998). Claves para la taxonomía de suelos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Octava edición. Washington D.C. 325 p.

Solano M. (2005). Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del Zinc. Tesis doctoral, doctorado en Química, Facultad de Química, Departamento de Química agrícola, Geología y Edafología, Universidad de Murcia, España, 370p.

Smith, L. A., Means, J. L., Chen, A., Alleman, B., Chapma, C. C., Tixier Jr., J. S., Brauning, S. E., Gavaskar, A. R., and Royer, M. D. (1995). Remedial Option for Metals-Contaminated Sites. Lewis, Boca Ratón, FL.

Stevenson F.J. (1982). Humus chemistry: génesis, composition, reactions. Wiley interscience, New York. 380p.

Suthersan, S. S. (1997). Remediation Engineering: Design Concepts. Lewis Publishers. Boca Raton, FL.

Thomas, R. W., and Koerner, R. M. (1996). Advances in HDPE barrier walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 14: 393-408.

Tiburtius, E. R. L., Peralta-Zamora, P., y Emmel, A. (2005). Treatment of gasoline-contaminated Waters by advanced oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 126: 86-90.

Valenzuela M., Claret M., Pérez C., Lagos B. (2009). Determinación del origen de la contaminación microbiológica del agua subterránea en una cuenca rural en Chile. Artículo publicado en la revista Agrociencia (43): 437 – 446.

Volke T., Velasco J.A. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Instituto Nacional de Ecología (INE). México. 62p.

Wu S.C., Cheung K.C., Luo Y. M. y Wong M. H. 2006. Effects of inoculation of plant growth promoting rhizobacteria on metal uptake by *Brassica juncea*. In Environmental pollution, No. 140 (1): 124- 135.

Zerbino, M.S.; Morón, A. 2003. Macrofauna del suelo y su relación con propiedades físicas y químicas en rotaciones cultivo-pastura. In Morón, A.; Díaz, R. (Eds. técnicos). Simposio “40 años de rotaciones agrícolas – ganaderas”. Montevideo, INIA. Serie Técnica No. 134. p. 45-53.

CIBERGRAFÍA

- CCE. (2002). Comisión de las Comunidades Europeas. Hacia una estrategia temática para la protección del suelo. [En línea] Comunicación de la comisión al consejo, el Parlamento Europeo, el comité económico y social y el comité de las regiones. Bruselas.

Disponible en:
http://www.oei.es/salactsi/ue.htm

- Ezkurra I. (1998). Investigación de la contaminación del suelo. Manual práctico. Sociedad pública de gestión ambiental IHOBE. Gobierno Vasco. 102p.

Disponible en:
http://www.ingenieroambiental.com/Manual_Suelos.pdf

- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2008. *Informe del estado el suelo en el mundo*. Sala de prensa oficina Principal Roma – Italia.

Disponible en:
http://www.fao.org/newsroom/es/news/2008/1000874/index.html

- FARN. (2005). Fundación Ambiente y Recursos Naturales. Marco legal aplicable al manejo de pesticidas. [En línea] Banco mundial, Argentina.

Disponible en:
http://www.farn.org.ar/arch/informe_pesticidas1.pdf

- García I. y Dorronsoro C. (2002). Contaminación del suelo: Contaminación del suelo e impacto ambiental. Tema 11. Universidad de Granada España, Edafología.

Disponible en:
http://edafologia.ugr.es/conta/tema11/agentes.htm

- García I. y Dorronsoro C. (2002). Contaminación del suelo: Contaminación por fitosanitarios: pesticidas. Tema 13. Universidad de Granada España, Edafología.

Disponible en:
http://edafologia.ugr.es/conta/tema13/clasif.htm#anchor501806

- Ormazabal F.J., Larrañaga E. (1998). Investigación de la contaminación del suelo. Guía metodológica. Estudio histórico y diseño de muestreo. Sociedad pública de gestión ambiental IHOBE. Gobierno Vasco - España. 74p.

Disponible en:
http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/DPGC/File/01.pdf

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO. (2000). Evaluación de la contaminación del suelo, capitulo 8 Eliminación de plaguicidas. Manual de referencia.

Disponible en:
http://www.fao.org/docrep/005/x2570s/X2570S00.htm#TOC

- Sabroso M.C., Pastor A. (2004). Guía sobre suelos contaminados. Confederación de pequeña y mediana empresa Aragonesa. Aragón España. 109p.

Disponible en:
http://www.conectapyme.com/files/medio/guia_suelos_contaminados.pdf

- Sánchez M. y Sánchez C. (1984). Los plaguicidas, adsorción y evolución en el suelo. Instituto de recursos naturales y agrobiología. Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC. Edición electrónica promovida por Ceres Net. Salamanca España. 51p.

Disponible en:
http://digital.csic.es/bitstream/10261/12919/1/plaguicidas.pdf

- Silva S.M., Correa F.J. (2009). Análisis de La contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. Artículo publicado en la revista Semestre Económico, Volumen 12, No. 23: 13- 34.

Disponible en:
http://redalyc.uaemex.mx/pdf/1650/165013122001.pdf